



UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL BASADAS EN LÓGICA DIFUSA EN LA INDUSTRIA

Correa Ramírez, Beatriz Helena
Vargas Díaz, Rodrigo Adolfo

Senior Elles, David
Director

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.
2005

RESUMEN

Actualmente han surgido nuevas técnicas de control agrupadas dentro de una nueva área denominada Control Inteligente. Dentro de estas técnicas se encuentra la Lógica difusa, la cual tiene la capacidad de solventar las desventajas de las técnicas convencionales de control, como los tradicionales PID y PD, entre otros.

La lógica difusa es aplicable a sistemas no lineales, robustos, y además tiene la capacidad de adaptarse a las condiciones variantes del sistema.

En este trabajo se hace referencia a los fundamentos teóricos de esta técnica y los parámetros necesarios para el diseño de este tipo de controladores. También se encuentran explicadas las aplicaciones más comunes del control difuso en la industria, sus características más representativas en estas aplicaciones y los beneficios que esta técnica trae consigo.

OBJETIVOS

General:

- Elaborar un documento mediante la recopilación y organización estructurada de información actualizada sobre la utilización en la industria de técnicas de control automático basadas en lógica difusa, con el fin de crear una base referencial que sea utilizada como herramienta de consulta.

Específicos:

- Conocer los antecedentes históricos de la lógica difusa en el control automático.
- Conocer los fundamentos teóricos de la lógica difusa y sus definiciones básicas.
- Identificar y definir cada uno de los parámetros de un controlador difuso.
- Especificar las aplicaciones del control difuso en la industria actual.
- Analizar los resultados obtenidos de la aplicación del control difuso en algunos procesos industriales.

1. INTRODUCCION

La lógica difusa nace en 1965 a partir de la publicación del artículo "**Fuzzy Sets**" escrito por Lofti Zadeh [2] para la revista **Information and Control**. Lofti Zadeh combinó los conceptos de la lógica y de los conjuntos de Lukasiewicz mediante la definición de grados de pertenencia. En contraste con la lógica convencional, que utiliza conceptos absolutos para referirse a la realidad, la lógica difusa la define en grados variables de pertenencia a los mismos, siguiendo patrones de razonamiento similares a los del pensamiento humano.

Así por ejemplo, mientras que dentro del marco rígido de la lógica formal un recinto está solamente "oscuro" (0) o "claro" (1), para la lógica difusa son posibles todas las condiciones relativas intermedias percibidas por la experiencia humana como "muy claro", "algo oscuro", "ligeramente claro", "extremadamente oscuro", etc. Las condiciones extremas o absolutas asumidas por la lógica formal son sólo un caso particular dentro del universo de la lógica difusa. Esta última nos permite ser relativamente imprecisos en la representación de un problema y aún así llegar a la solución correcta.

Así, la Lógica Difusa ha cobrado una gran fama por la variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde el control de procesos industriales complejos hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, pasando por la construcción de artefactos electrónicos de uso doméstico y de entretenimiento,

así como también de sistemas de diagnóstico. De hecho, desde hace ya al menos década y media, la expedición de patentes industriales de mecanismos basados en la lógica difusa tiene un crecimiento sumamente rápido en todas las naciones industrializadas.

2. FUNDAMENTOS DE LOGICA DIFUSA

2.1. BREVE RESEÑA HISTORICA DE LA LOGICA DIFUSA

Desde la época de los grandes filósofos griegos se ha venido cuestionando la efectividad de la dicotomía cierto-falso y posteriores pensadores también han formulado sus conceptos hasta cuando Zadeh habla de los conjuntos difusos y moldea luego la teoría de la lógica difusa como se observa a continuación:

- En el 380 A.C, Aristóteles propone la existencia de grados de verdad o falsedad.
- En el siglo XVIII, en Inglaterra el filósofo David Hume habla de la lógica del sentido común (razonamiento basado en la experiencia que la gente comúnmente adquiere de sus vivencias por el mundo). El filósofo norteamericano Charles Sander Pierce, fue el primero en considerar la vaguedad en vez de la dicotomía cierto-falso, como una forma de enmarcar cómo el mundo y las personas funcionan. También en este siglo es inventada la teoría original de conjuntos clásicos de unos y ceros por el matemático alemán Georg Kantor.
- En 1920 el filósofo polaco Jan Lukasiewicz propone la primera lógica de vaguedad. Desarrolló conjuntos con posibles valores de pertenecía 0, $\frac{1}{2}$ y 1 (lógica trivaluada). Posteriormente los extendió hacia un número infinito de valores entre 0 y 1 (lógica multivaluada).

- En 1962 Lotfi Zadeh cuestiona la efectividad de las matemáticas tradicionales, las cuales resultaban intolerantes ante la imprecisión y ante verdades parciales.
- En 1964 Aparece por primera vez la noción de conjuntos difusos en un memorándum debido al mismo Zadeh en la Universidad de California en Berkeley. Dicho memorándum es publicado un año más tarde bajo el título: "*Fuzzy Sets*" (Conjuntos difusos).
- En 1965, la revista "Information and Control" publica el memorándum anterior, en donde aparece el artículo de Zadeh, "*Fuzzy Sets*".
- En 1971, Zadeh publica el artículo, "*Quantitative Fuzzy Semantics*", en donde Introduce los elementos formales que acabarían componiendo el cuerpo de la doctrina de la lógica difusa y sus aplicaciones tal como se conocen en la actualidad.
- En 1974, el Británico Ebrahim Mandani, demuestra la aplicabilidad de la lógica difusa en el campo del control. Desarrolla el primer sistema de control Fuzzy práctico, la regulación de un motor de vapor.
- A finales de los 70's, Los ingenieros daneses Lauritz Peter Holmbland y Jens-Jurgen Ostergaard desarrollan el primer sistema de control difuso comercial, destinado a una planta de cemento. Los japoneses empiezan a explotar la lógica difusa de forma masiva. Los occidentales asumieron una actitud reacia principalmente por dos razones: la primera era porque la palabra "Fuzzy" sugería algo confuso y sin forma, y la segunda porque no había forma de

probar analíticamente que la teoría funcionaba correctamente, ya que el control *fuzzy* no estaba basado en modelos matemáticos.

- Aparecen toda una serie de investigadores japoneses en el campo de la lógica difusa tales como Sugeno, Togai, Bart Kosko (el fuzzsensei), entre otros.
- En 1986, Yamakawa, publica el artículo, "*Fuzzy Controller hardware system*". Desarrolla controladores *fuzzy* en circuitos integrados.
- En 1987, se inaugura en Japón el subterráneo de Sendai, uno de los más espectaculares sistemas de control difuso creados por el hombre. Desde entonces el controlador inteligente ha mantenido los trenes rodando eficientemente.
- En 1987, "FUZZY BOOM", se comercializan multitud de productos basados en la lógica difusa (sobre todo en Japón).

2.2. TEORIA DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS (*Fuzzy Sets*)

La palabra fuzzy es un término fotográfico que alude a la condición de movido o borroso en el sentido de imágenes con los contornos mal definidos. De ahí la traducción de Difuso o Borroso que empleamos en castellano.

La idea de Zadeh es hacer que el rango de valores de pertenencia de un elemento a un conjunto pueda variar en el intervalo $[0,1]$ en lugar de limitarse a uno de los valores del par $\{0,1\}$ (o lo que es lo mismo Falso, Verdadero).

En palabras de Zadeh (1992), las características más notables de la Lógica difusa son:

- En Lógica difusa todo es cuestión de grado.
- El Razonamiento Exacto es un caso limite del Razonamiento Aproximado.
- En lógica difusa el conocimiento se interpreta como una colección de restricciones elásticas (difusas) sobre un conjunto de variables.
- En lógica difusa la inferencia puede verse como la propagación de un conjunto de restricciones elásticas.
- Sistema Difuso (SD): Es el resultado de la “fuzzificación” de un sistema convencional.
- Los Sistemas Difusos operan con conjuntos difusos en lugar de números.
- En esencia la representación de la información en Sistemas Difusos imita el mecanismo de Razonamiento Aproximado que realiza la mente humana.

Un conjunto clásico es una colección de objetos de cualquier clase. El concepto de un conjunto se ha vuelto una de las nociones más fundamentales de la Matemática. La denominada Teoría de Conjuntos se fundó por el matemático alemán George Cantor (1845-1918) [3]. En la teoría de conjuntos la noción de “conjunto” y “elemento” es primitiva. Ellos no se definen por lo que se refiere a otros conceptos. Un conjunto se especifica totalmente por los elementos que contiene. Permitiendo A ser un conjunto, “ $x \in A$ ” significa que x es un elemento del conjunto A y “ $x \notin A$ ” significa que x no pertenece al conjunto A.

Nota 1 En la Teoría de la Lógica Difusa los conjuntos no difusos son llamados conjuntos “crisp” y sus elementos o valores son llamados de igual manera valores “crisp”, y de esta manera se hace referencia a dichos conjuntos clásicos [3].

Una manera de definir un conjunto es enumerar sus elementos y otra es usar un predicado $P(x)$, esto significa que cada elemento x del conjunto tiene una propiedad P . Una tercera manera es la definición de un conjunto A usando su función característica μ_A , que permite definir A en el dominio X , el cual es un conjunto clásico con los elementos 1 y 0.

Mientras que en un conjunto clásico los elementos pertenecen o no pertenecen a él totalmente (por ejemplo un número puede pertenecer o no al conjunto de los pares, pero no pertenecerá con un determinado grado), en los conjuntos difusos hay grados de pertenencia en referencia a un universo local. Por ejemplo en el contexto de nuestra sociedad actual una persona de 45 años pertenecerá al conjunto difuso “viejo” con un grado supongamos de 0.5. Si en vez de usar de referencia nuestra sociedad actual aludimos a una sociedad donde la esperanza de vida fueran 40 años este grado cambiaría.

A será un Subconjunto Borroso de B cuando:

$$\mu_A(X) \leq \mu_B(X), \forall_x \in X \quad (1)$$

Originalmente la teoría de conjuntos difusos se formuló basándose en conjuntos de operadores también válidos para conjuntos clásicos: Negación, Unión e intersección. Las cuales serán explicadas mas adelante

Posteriormente se han definido clases de funciones con propiedades axiomáticas adecuadas a la utilidad de cada operador, principalmente las T-normas y T-conormas, que sirven como modelos de la intersección y la unión respectivamente. El origen del uso de las T-normas y T-conormas se remonta a las consecuencias del artículo de Menger de 1942 "**Statistical Metrics**". Para establecer la desigualdad triangular (en un triángulo cualquiera, la suma de dos lados siempre es mayor que el tercero), discípulos de Menger establecieron y estudiaron el concepto de norma triangular (T-norma) como operación tipo para componer (sumar probabilísticamente) los lados de un triángulo que no "midan" un número, sino una función de distribución de probabilidad. Posteriormente se han revelado como herramienta adecuada para formalizar la intersección difusa.

Pero para completar un tipo de razonamiento análogo al que se realiza con lógica clásica es necesario definir el concepto de implicación. Una implicación borrosa I es en general una función de la forma:

$$I : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (2)$$

Para cualesquiera dos valores ciertos a y b de proposiciones borrosas p , q , define el valor cierto $I(a, b)$ de la proposición condicional "si p entonces q ". Es una extensión de la implicación clásica $p \rightarrow q$ del dominio restringido $\{0, 1\}$ al dominio completo $[0, 1]$.

Así como en lógica clásica una implicación se puede expresar de distintas formas y todas son equivalentes, sus extensiones a lógica difusa resultan no ser equivalentes y han dado lugar a diferentes clases de implicaciones difusas.

2.2.1. VARIABLES LINGÜÍSTICAS.

El centro de las técnicas de modelado difuso es la idea de variable lingüística. Desde su raíz, una variable lingüística es el nombre de un conjunto difuso. Si tenemos un conjunto difuso llamado "largo" éste es una simple variable lingüística y puede ser empleada como una regla-base en un sistema basado en la longitud de un proyecto en particular Si duración-proyecto es largo entonces la-terminación-de-tareas es DECRECIENTE; Una variable lingüística encapsula las propiedades de aproximación o conceptos de imprecisión en un sistema y da una forma de computar adecuada. Esto reduce la aparente complejidad de describir un sistema que debe concordar con su semántica. Una variable lingüística siempre representa un espacio difuso.

Lo importante del concepto de variable lingüística es su estimación de variable de alto orden más que una variable difusa. En el sentido de que una variable lingüística toma variables difusas como sus valores. En el campo de la semántica difusa cuantitativa al significado de un término "x" se le representa como un conjunto difuso $M(x)$ del universo de discusión. Desde este punto de vista, uno de

los problemas básicos en semántica es que se desea calcular el significado de un término compuesto.

La idea básica sugerida por Zadeh es que una etiqueta lingüística tal como "muy", "más o menos", "ligeramente", etc... puede considerarse como un operador que actúa sobre un conjunto difuso asociado al significado de su operando. Por ejemplo en el caso de un término compuesto "muy alto", el operador "muy" actúa en el conjunto difuso asociado al significado del operando "alto".

2.2.2. EJEMPLO DE CONJUNTOS DIFUSOS

Con el objetivo de aclarar los conceptos de los conjuntos y operaciones difusas a continuación se presenta dos ejemplos. En el primero de ellos se hará una comparación con la lógica clásica (conjuntos clásicos o crisp):

1. El ejemplo muestra los conjuntos donde se clasifican la edad de las personas como *joven*, *adulto* y *anciano*.

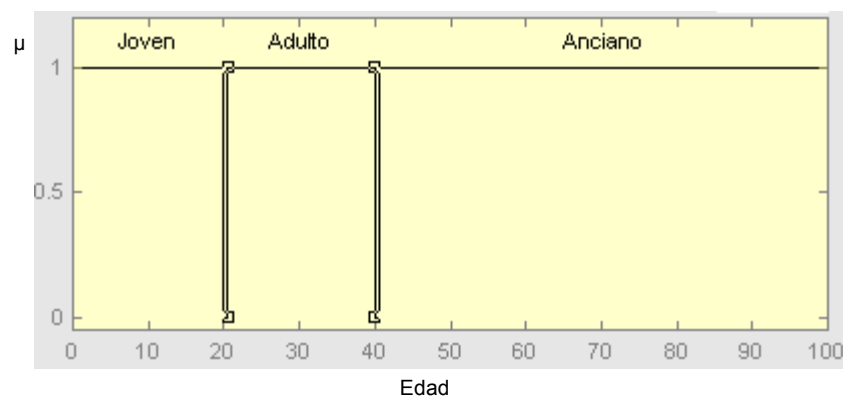


FIGURA 1. Conjunto clásico (Crisp)

En la figura1 tenemos una representación utilizando conjuntos no difusos o discretos (“**crisp sets**”). Según esta representación una persona que tenga 20 años. Es considerada joven, y en cambio una persona con 20 años y un día de vida. Ya no lo es. Vemos que esto no se corresponde con la realidad. Por tal motivo, en el siguiente ejemplo se especifica la funcione de pertenencia del conjunto difuso los cuales se hacen razonamientos similares a los humanos.

En el caso de **joven**, de acuerdo a encuestas realizadas en Colombia se puede considerar la función de pertenencia $\mu_{Joven}(X)$, que primero se presenta de manera Intuitiva e informal de la siguiente manera:

- a) Si el sujeto x tiene una edad inferior a 20, es con toda seguridad joven.
- b) Si el sujeto x tienen una edad comprendida entre 20 y 30 años se interpola de forma continua y lineal entre el extremo anterior y el siguiente.
- c) Si el sujeto tiene una edad superior a 30 años se le considerará con toda seguridad no joven, es decir, no será joven en absoluto.

A continuación se muestra la gráfica de la función de pertenencia tal y como se ha descrito informalmente:

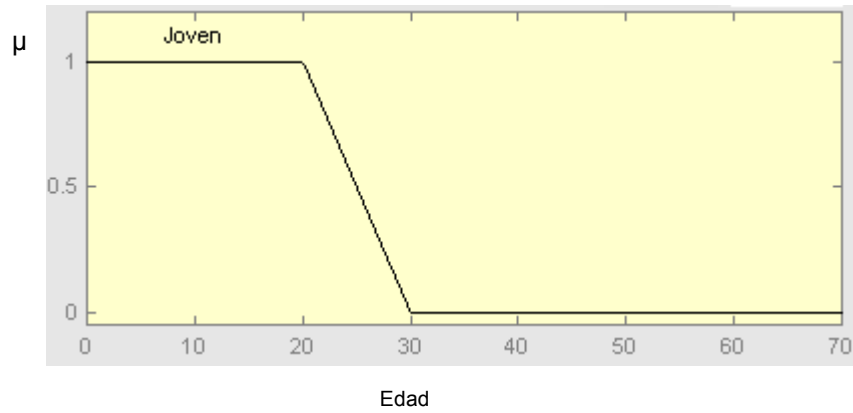


FIGURA 2. Función de pertenencia de las Personas de edad joven

A continuación se muestra la expresión analítica de la gráfica anterior:

$$\mu_{joven}(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < 20 \\ \frac{30-x}{10} & 20 \leq x \leq 30 \\ 0 & x > 30 \end{cases} \quad (3)$$

En lo concerniente al conjunto **adulto**, de acuerdo a encuestas realizadas en Colombia se puede considerar la función de pertenencia $\mu_{Adulto}(x)$ que primero se presenta de manera intuitiva e informal de la siguiente manera:

- a) Si el sujeto x tiene una edad inferior a 20 no es adulto en absoluto.
- b) Si el sujeto x tienen una edad comprendida entre 20 y 30 años se interpola de forma continua y lineal entre el extremo anterior y el siguiente.
- c) Si el sujeto x tienen una edad comprendida entre 30 y 40 años se interpola de forma continua y lineal entre el extremo anterior y el siguiente.
- d) Si el sujeto tiene una edad superior a 40 años no se le considerará con toda seguridad adulto.

La representación gráfica es la que presenta a continuación:

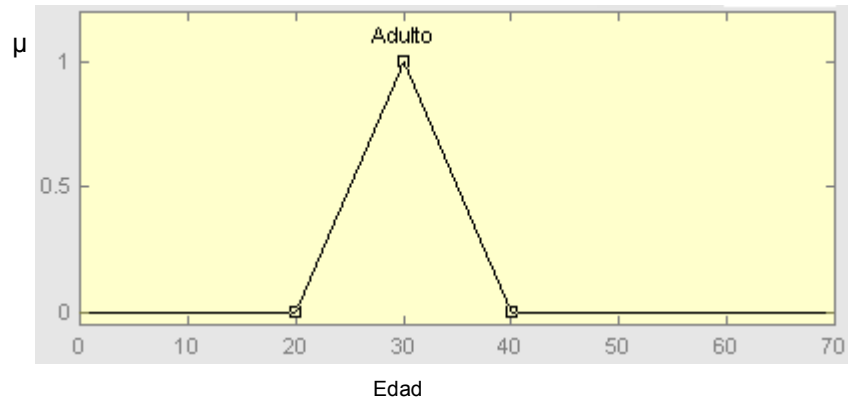


FIGURA 3. Función de pertenencia de las Personas de edad Adulto

La expresión analítica es:

$$\mu_{adulto}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 20 \\ \frac{x-20}{10} & 20 \leq x < 30 \\ \frac{40-x}{10} & 30 \leq x < 40 \\ 0 & 40 \leq x \end{cases} \quad (4)$$

Por último, para el caso de **anciano**, de acuerdo a encuestas realizadas en Colombia se puede considerar la función de pertenencia $\mu_{Anciano}(x)$ que primero se presenta de manera intuitiva e informal de la siguiente manera:

- Si el sujeto x tiene una edad inferior a 30 no es anciano en absoluto.
- Si el sujeto x tienen una edad comprendida entre 30 y 40 años se interpola de forma continua lineal entre el extremo anterior y el siguiente.
- Si el sujeto tiene una edad superior a 40 años se le considerará con toda seguridad anciano.

La gráfica es la que se muestra a continuación:



FIGURA 4. Función de pertenencia de las Personas de edad Anciano

La expresión analítica será, por tanto:

$$\mu_{\text{anciano}}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 30 \\ \frac{x-30}{10} & 30 \leq x \leq 40 \\ 1 & 40 < x \end{cases} \quad (5)$$

A continuación se presenta la grafica del conjunto difusos de joven, adulto y anciano, y de acuerdo a esto una persona que tenga 28 años se considera que es:

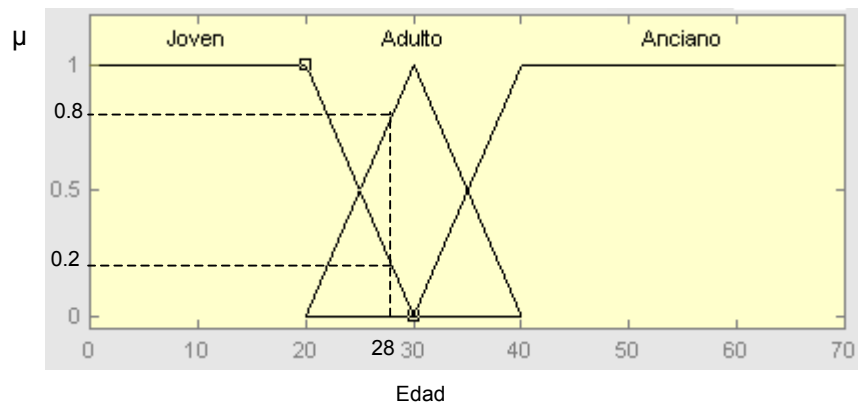


FIGURA 5. Conjunto difuso de clasificación de la edad de las Personas

Joven = 0.2 Adulto = 0.8 Anciano = 0

El grado de pertenencia de esta persona al conjunto Joven es de 0.2 y al conjunto Adulto es de 0.8, lo cual indica que esta persona es más adulta que joven, pero todavía es “algo joven”. La pertenencia de la edad de la persona a dos conjuntos difusos viola la ley del tercio excluido de la lógica clásica, en la cual un elemento puede pertenecer a un solo conjunto.

2. El siguiente ejemplo muestra los conjuntos donde se clasifican la estatura de las personas como *Bajo*, *Medio* y *Alto*.

En el caso de **Bajo**, de acuerdo a encuestas realizadas en Colombia se puede considerar la función de pertenencia $\mu_{Bajo}(x)$, que primero se presenta de manera Intuitiva e informal de la siguiente manera:

- a) Si el sujeto x tiene una estatura inferior a 1mt, es con toda seguridad bajo.
- b) Si el sujeto x tienen una estatura comprendida entre 1 y 1.5 mt se interpola de forma continua y lineal entre el extremo anterior y el siguiente.
- c) Si el sujeto tiene una estatura superior a 1.5 mt se le considerará con toda seguridad que no es bajo.

A continuación se muestra la gráfica de la función de pertenencia tal y como se ha descrito informalmente:



FIGURA 6. Función de pertenencia de las Personas de estatura baja

A continuación se muestra la expresión analítica de la gráfica anterior:

$$\mu_{bajo}(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < 1 \\ 3 - 2X & 1 \leq x \leq 1.5 \\ 0 & x > 30 \end{cases} \quad (6)$$

En lo concerniente al conjunto **Medio**, de acuerdo a encuestas realizadas en Colombia se puede considerar la función de pertenencia $\mu_{Medio}(x)$ que primero se presenta de manera intuitiva e informal de la siguiente manera:

- a) Si el sujeto x tiene una estatura inferior a 1mt no es de estatura media.
- b) Si el sujeto x tienen una estatura comprendida entre 1 y 1.5 mt se interpola de forma continua y lineal entre el extremo anterior y el siguiente.
- c) Si el sujeto x tienen una estatura comprendida entre 1.5 y 2 mt se interpola de forma continua y lineal entre el extremo anterior y el siguiente.
- d) Si el sujeto tiene una estatura superior a 2 mt no se le considerará con toda seguridad de estatura media.

La representación gráfica es la que presenta a continuación:

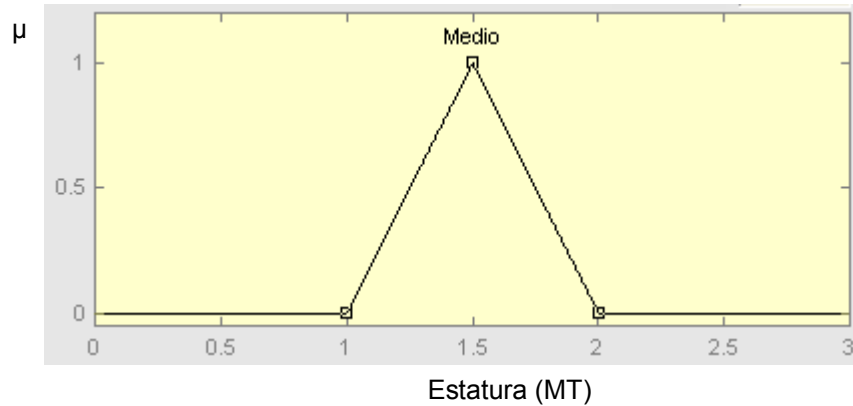


FIGURA 7. Función de pertenencia de las Personas de estatura Media

La expresión analítica es:

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq X < 1 \\ 2X - 2 & 1 \leq X < 1.5 \\ -2X + 4 & 1.5 \leq X < 2 \\ 0 & 2 < X \end{cases} \quad (7)$$

Por último, para el caso de de estatura **alta**, de acuerdo a encuestas realizadas en Colombia se puede considerar la función de pertenencia $\mu_{Alta}(x)$ que primero se presenta de manera intuitiva e informal de la siguiente manera:

- a) Si el sujeto x tiene una estatura inferior a 1.5 mt no es alto en absoluto.
- b) Si el sujeto x tienen una estatura comprendida entre 1.5 y 2 mt se interpola de forma continua lineal entre el extremo anterior y el siguiente.
- c) Si el sujeto tiene una estatura a 2 mt se le considerará con toda seguridad alto.

La gráfica es la que se muestra a continuación:

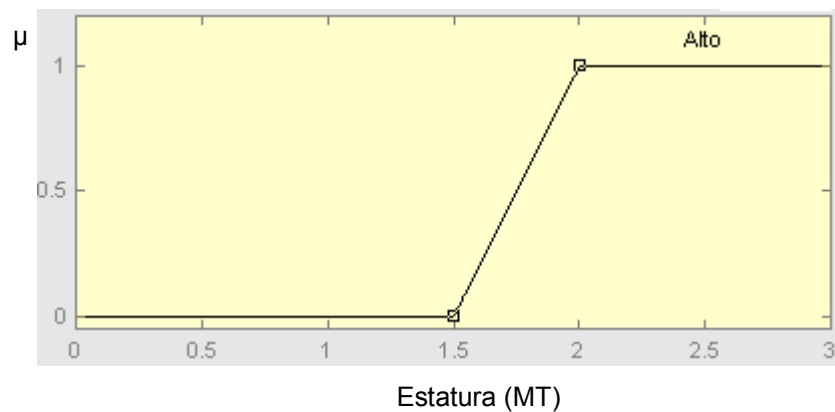


FIGURA 8. Función de pertenencia de las Personas de estatura Alta

La expresión analítica será, por tanto:

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 30 \\ \frac{x-30}{10} & 30 \leq x \leq 40 \\ 1 & 40 < x \end{cases} \quad (8)$$

A continuación se presenta la grafica del conjunto difusos de Bajo, Medio y Alto, y de acuerdo a esto una persona que tenga 1.7 mt se considera que es:

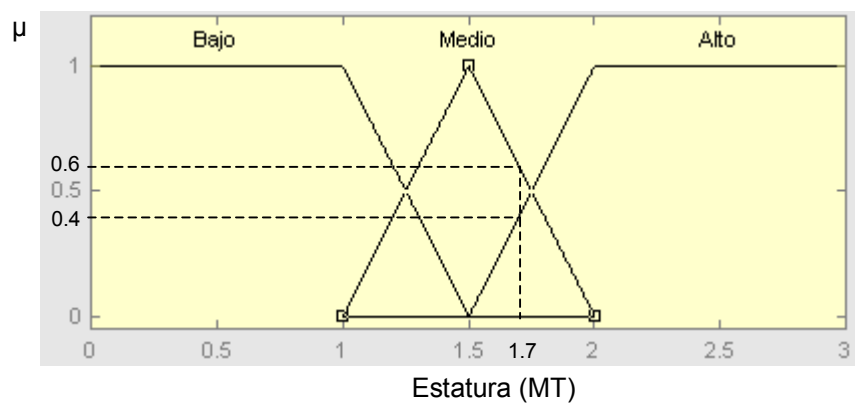


FIGURA 9. Conjunto difuso de clasificación de la estatura de las Personas

Bajo = 0 Medio = 0.6 Alto = 0.4

El grado de pertenencia de esta persona al conjunto Alto es de 0.2 y al conjunto Medio es de 0.8, lo cual indica que esta persona es más de estatura media que alto, pero se puede considerar que es “algo alto”.

Existen diferentes formas de funciones de pertenencia con las que se pueden representar los conjuntos difusos. Las más importantes se presentan en la figura

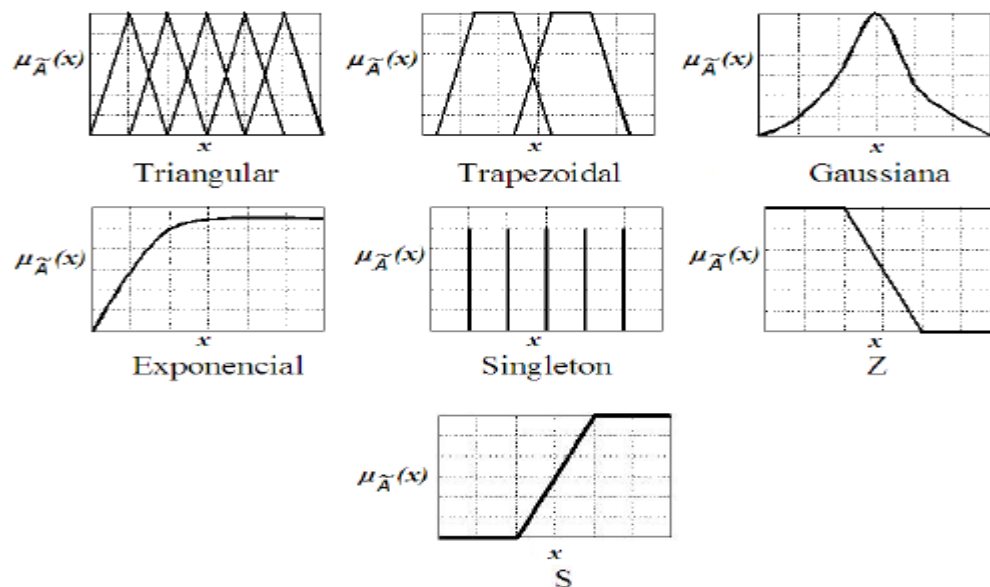


FIGURA 10. Funciones de pertenencia de lo conjunto difusos.

2.2.3. OPERACIONES CON CONJUNTOS DIFUSOS

Para conjuntos difusos en un dominio D , Zadeh introduce las siguientes definiciones y operaciones, que como observaremos son extensiones de las correspondientes a conjuntos normales.

Un conjunto difuso A está **vacío** si y sólo si su función de pertenencia es idénticamente 0 en todo D .

$$A \text{ vacío si y sólo si } \mu_A(X) = 0 \quad "x \in D" \quad (9)$$

Dos conjuntos difusos A y B son **iguales** (equivalencia) si y sólo si para todo elemento del dominio sus valores de la función de pertenencia a A y B son los mismos:

$$A = B \text{ Si y sólo si } \mu_A(x) = \mu_B(x) \text{ para todo } x \in D \quad (\mu_A = \mu_B) \quad (10)$$

La relación de inclusión: A está contenido en B (o A es **subconjunto** de B) si y sólo si para todo elemento del dominio su valor de pertenencia al conjunto difuso A es menor o igual que su valor de pertenencia al conjunto difuso B .

$$A \subseteq B \text{ Si y sólo si } \mu_A(x) \leq \mu_B(X) \text{ para cualquier } X \in D \quad (\mu_A \leq \mu_B) \quad (11)$$

Las operaciones básicas entre conjuntos son: Complemento, unión e intersección como operaciones difusas entre sus funciones de pertenencia, Estas operaciones difusas son descritas a continuación mediante los conjuntos μ_A y μ_B de la figura 11 respectivamente

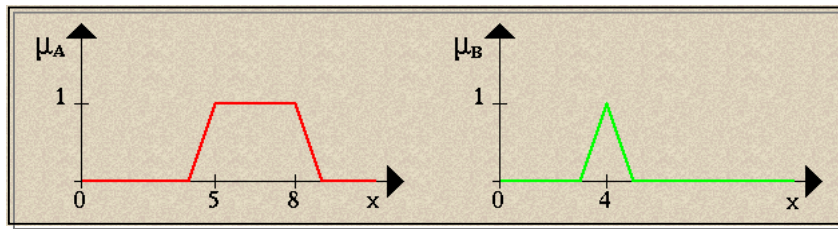


FIGURA 11. Conjuntos difusos μ_A y μ_B

2.2.3.1. CONJUNCIÓN O INTERSECCIÓN «Y» (\wedge)

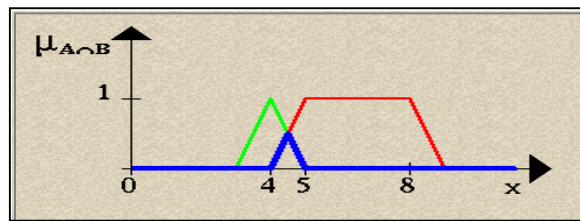


FIGURA 12. Representación de la operación de intersección para los Conjuntos difusos μ_A y μ_B

Si tenemos dos conjuntos difusos, $A \subset D1$ y $B \subset D2$, y un par $(x, y) \in D1 \times D2$, la conjunción que nos indica en qué medida X pertenece al conjunto difuso A e Y pertenece al conjunto difuso B se puede especificar como:

$$\mu_{A \cap B}(X, Y) = \min[\mu_A(X), \mu_B(Y)] \quad (12)$$

Podemos definir la conjunción utilizando cualquier T-norma.

2.2.3.2. DISYUNCIÓN O UNIÓN «O» (\vee)

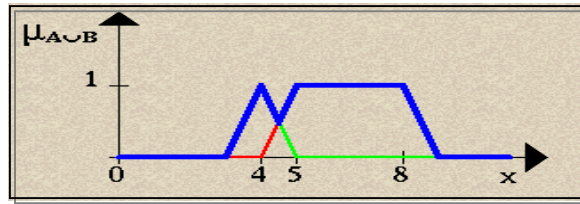


FIGURA 13. Representación de la operación de unión para los Conjuntos difusos μ_A y μ_B

Si tenemos dos conjuntos difusos, $A \subset D1$ y $B \subset D2$, y un par $(x, y) \in D1 \times D2$, la disyunción que nos indica en qué medida x pertenece al conjunto difuso A o y pertenece al conjunto difuso B se puede implementar como:

$$\mu_{A \cup B}(X, Y) = \max[\mu_A(X), \mu_B(Y)] \quad (13)$$

Podemos definir la conjunción utilizando cualquier T-conorma.

2.2.3.3. NEGACIÓN «NO» (\neg)

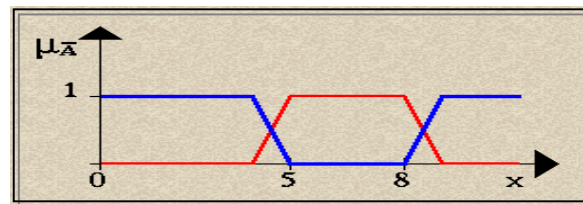


FIGURA 14. Representación de la operación de Negación para el Conjunto difuso μ_A

La negación de una determinada expresión lógica puede derivarse de la original calculando el complemento:

$$\mu_{\neg A}(X) = 1 - \mu_A(X) \quad (14)$$

De acuerdo a los dos conjunto difusos definidos como estatura y edad de las personas, se realizan las operaciones difusas de intersección y unión utilizando el operador tipo Mandani.

CONJ	ATRIBUTO	ATRIBUTO	GRADO DE PERTENENCIA				T-Conorma ZADEH	T-Norma ZADEH
	Edad	Estatura (mt)	joven	Adulto	Medio	Alto	Adulto OR Medio $\max[\mu_A(X), \mu_B(Y)]$	Joven AND Alto $\min[\mu_A(X), \mu_B(Y)]$
Rodrigo	22	1,7	0,8	0,2	0,6	0,4	0,6	0,4
Pedro	15	1,2	1	0	0,4	0	0,4	0
Maria	35	1,6	0	0,5	0,8	0,2	0,8	0
Susana	28	1,9	0,2	0,8	0,2	0,8	0,8	0,2

TABLA 1. Operaciones difusas de OR y AND aplicado a los dos ejemplos (estatura y edad).

Concluyendo los resultados obtenidos a dicha consulta las personas que aplican para la pregunta ¿personas de edad adulta o de estatura media?, encontramos que todas las personas aplican pero Maria y Susana son las que mayor grado de pertenencia tienen (es de 0.8 en este conjunto) y la persona que menos aplica en este conjunto es pedro ya que aunque pertenezca al conjunto de personas de estatura media con un grado de pertenencia de 0.4 el es totalmente joven.

De igual modo para la pregunta ¿Personas Jóvenes y Adultas?, la persona que aplican son Rodrigo y Susana, pero Rodrigo aplica con un mayor grado de pertenencia el cual es de 0.4 y la persona que menos aplica es Susana ya que

aunque sea bastante alta es decir con un grado de pertenencia de 0.8 no es muy joven, es decir con un grado de pertenencia en el conjunto de joven de 0.2.

2.2.4. IMPLICACIONES DIFUSAS «SÍ... ENTONCES» (\rightarrow)

Con la expresión $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ hacemos referencia a la medida del grado de verdad de la relación de implicación entre x e y . En Lógica Difusa hay muchas maneras de representar la relación entre antecedente y consecuente ($A \rightarrow B$) basándose en las distintas definiciones de t-normas y t-conormas. Corresponderían a sentencias del tipo «si A entonces B » donde A y B son etiquetas de conjuntos difusos representando valores de x e y , respectivamente. Así, por ejemplo, podríamos tener: «si x no es muy alto entonces y es muy joven».

Este concepto es importante desde el punto de vista de la ingeniería, ya que la relación *causa-efecto* es la piedra angular del modelado. Así, incluso se habla de operadores de implicación de ingeniería. Veamos algunas de los más conocidos y utilizados en aplicaciones de control difuso:

$$\text{Brouwer-Gödel} \quad \mu_{BG}(X, Y) = \begin{cases} 1 & \text{Si } \mu_A(X) \leq \mu_B(Y) \\ \mu_B(Y) & \text{Si } \mu_A(X) > \mu_B(Y) \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{Goguen} \quad \mu_G(X, Y) = \begin{cases} 1 & \text{Si } \mu_A(X) = 0 \\ \min(\frac{\mu_A(X)}{\mu_B(Y)}, 1) & \text{Si } \mu_B(Y) \neq 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{Kleene-Dienes} \quad \mu_{KD}(X, Y) = \max\{1 - \mu_A(X), \mu_B(Y)\} \quad (17)$$

$$\text{Larsen} \quad \mu_{LA}(X, Y) = \mu_A(X) * \mu_B(Y) \quad (18)$$

$$\text{Lukasiewicz} \quad \mu_L(X, Y) = \min\{1 - \mu_A(X) + \mu_B(Y), 1\} \quad (19)$$

$$\text{Mandani} \quad \mu_M(X, Y) = \min\{\mu_A(X), \mu_B(Y)\} \quad (20)$$

$$\text{Reinchenbach} \quad \mu_R(X, Y) = 1 - \mu_A(X) + \mu_A(X) * \mu_B(Y) \quad (21)$$

$$\text{Reschner-Gainer} \quad \mu_{RG}(X, Y) = \begin{cases} 1 & \text{Si } \mu_A(X) \leq \mu_B(Y) \\ 0 & \text{Si } \mu_A(X) > \mu_B(Y) \end{cases} \quad (22)$$

$$\text{Willmott} \quad \mu_W(X, Y) = \max\{1 - \mu_A(X), \min(\mu_A(X), \mu_B(Y))\} \quad (23)$$

Cuando las funciones de pertenencia toman únicamente los valores 0 o 1, los implicadores anteriores, excepto los de Mamdani y Larsen, son compatibles con la implicación de la lógica clásica (Tabla 2: Preservación de la implicación clásica).

Sin embargo, estos dos son ampliamente utilizados en procesos de inferencia en implicaciones de la lógica difusa a problemas de ingeniería por su simplicidad de computación y por su mayor adecuación al sentido común en estos procesos, aunque no se basen en la relación causa-efecto (pero si que la preservan en el caso de que el antecedente sea verdadero).

CONJUNTOS		IMPLICACIONES								
$\mu_A(x)$	$\mu_B(x)$	BG	G	KD	LA	L	M	R	RG	W
0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
1	0	0		0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

TABLA 2. Preservación de implicación clásica

2.2.5. DEFINICIONES Y PROPIEDADES

- Altura de un Conjunto Difuso (**height**): El mayor valor de su función de pertenencia:

$$\sup\{ A(x) | x \in X \}. \quad (24)$$

- Conjunto Difuso Normalizado (**normal**): Aquel para el que existe un elemento que pertenece al conjunto difuso totalmente, es decir, con grado 1. Dicho de otro modo $\text{Altura}(A) = 1$.
- Soporte de un Conjunto Difuso (**support**): Elementos de X que pertenecen a A con grado mayor a 0:

$$\text{Soporte}(A) = \{ x \in X | A(x) > 0 \} \quad (25)$$

- Núcleo de un Conjunto Difuso (**core**): Elementos de (x) que pertenece al conjunto con grado 1:

$$\text{Nucleo}(A) = \{ x \in X \mid A(x) = 1 \} \quad (26)$$

- Conjunto Difuso Convexo o Cóncavo: Aquel cuya función de pertenencia cumple

$$\text{Convexo:} \quad A(\lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2) \geq \min \{ A(x_1), A(x_2) \} \quad (27)$$

$$\text{Cóncavo:} \quad A(\lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2) \leq \max \{ A(x_1), A(x_2) \} \quad (28)$$

$$\text{Para cualesquiera } x_1 \text{ y } x_2 \text{ de } X \text{ y } \lambda \in [0,1] \quad (29)$$

2.3. TEORIA DEL RAZONAMIENTO APROXIMADO

El Razonamiento es la habilidad de inferir información sobre alguna faceta desconocida de un problema a partir de la información disponible [1], por ejemplo, cuando un sistema falla, intentamos descubrir por qué ha fallado observando los síntomas.

Zadeh introdujo la teoría del razonamiento aproximado y otros muchos autores han hecho contribuciones importantes a este campo. Aunque superficialmente pueda parecer que la teoría del razonamiento aproximado y la lógica clásica se diferencian enormemente, la lógica clásica puede ser vista como un caso especial de la primera. En ambos sistemas, se pueden ver a las premisas como inductoras de subconjuntos de mundos posibles que las satisfacen, aunque en el caso de la

teoría del razonamiento aproximado esos conjuntos serán subconjuntos difusos.

La inferencia en ambos sistemas está basada en una regla de inclusión:

Una hipótesis se infiere de una colección de premisas si el subconjunto de mundos posibles que satisfacen la conjunción de las premisas está contenido en el subconjunto de mundos posibles que satisfacen la hipótesis. La contribución fundamental del razonamiento aproximado es el uso que hace de las variables y la representación de las proposiciones en términos de valores de verdad lingüísticos -subconjuntos borrosos- como valores de esas variables. La lógica clásica sólo usa de modo implícito la idea de variable, en el sentido de valor de verdad asociado a una proposición. Sin embargo, su naturaleza binaria le permite ocultar este hecho, ya que nos podemos referir a una proposición que es verdadera por su denotación, p , y a una que es falsa simplemente por su negación, $\neg P$, evitando así la introducción de una variable V_p cuyo valor sea la valoración de la proposición P . El uso del concepto de variable en la teoría del razonamiento aproximado conduce a tratar dominios que no están dentro del ámbito de la lógica clásica, como es el caso de los problemas que tratan los Sistemas Expertos difusos o los controladores difusos. La teoría del razonamiento aproximado permite representar también cuantificadores lingüísticos situados entre el “*para todo*” y el “*existe*” clásicos. Esto facilita representar enunciados como “*la mayoría de los coches lujosos son caros*” o “*bastantes electores votarán en blanco*”. Zadeh indicó que un cuantificador como “*la mayoría*” puede ser representado como un

subconjunto difuso sobre un universo de discurso. Los cuantificadores aproximados se usan para representar conocimiento de sentido común.

Una extensión interesante de la teoría del razonamiento aproximado es la posibilidad de tratar con ella conocimiento prototípico. Reiter sugirió una aproximación a la representación de conocimiento de sentido común usando reglas por defecto y Yager lo estudió en el marco de la teoría del razonamiento aproximado. De acuerdo con Reiter, una regla por defecto tal como “*típicamente los pájaros vuelan*”, puede ser interpretada así: si un objeto es un pájaro y nuestro conocimiento disponible no es incompatible con que el objeto vuele, entonces asumimos que el pájaro vuela.

La lógica binaria puede ser vista como un caso especial de la teoría del razonamiento aproximado en el cual los conjuntos base tienen dos elementos {T, F} y los grados de pertenencia se restringen a 1 ó 0. La lógica posibilística puede ser vista como una extensión de ésta, en tanto que, aunque se restringen los conjuntos base de valores a dos, T y F, se permiten que los grados de pertenencia sean números en el intervalo unidad.

La Lógica difusa extiende la lógica binaria permitiendo su formalización en términos de la teoría del razonamiento aproximado. Así, p es verdadero alcanzaría la representación V_p es {1/T, 0/F}, p es falso, V_p es {0/T, 1/F} y V_p es {1/T, 1/F} indica que el valor de verdad de la proposición es desconocido. En cualquiera de

los casos, el conjunto base asociado a la variable valor de verdad de la proposición p es $\{T, F\}$.

La regla principal de inferencia en lógica clásica, modo de razonamiento ya introducido por los Megáricos y Estoicos en tiempos de Aristóteles, es el **Modus Ponens** (nombre asignado en la Edad Media), que consiste en que si se tiene la regla $A \rightarrow B$ y se da el hecho A se puede concluir B , por ejemplo, si la regla es “Si llueve entonces me mojo” si se da el hecho cierto de que “llueve”, entonces podré concluir que “me mojo”. En lógica difusa se puede generalizar esta regla, quedando su esquema de la siguiente forma:

Regla: Si x es A , entonces y es B .

Hecho: x es A'

Conclusión: y es B'

Por ejemplo, la regla podría ser “Si la ciudad es grande (x es A), el tráfico es muy denso (y es B)”, el hecho podría ser “la ciudad no es muy grande (x es A')”, ¿Qué se podría decir del tráfico ($B'(x)$)?

Supongamos que las variables están relacionadas no necesariamente por una función, sino por cualquier relación. Supongamos que es una relación binaria difusa R en el universo $X \times Y$. A' y B' son conjuntos difusos en X e Y

respectivamente. Si conocemos R y A' podríamos conocer B' mediante la denominada **Regla composicional de inferencia**:

$$\begin{aligned} B' &= A'(x) \circ R(x, y) \\ B'(y) &= \sup_{x \in X} \min[A'(x), R(x, y)] \\ \text{Donde } R(x, y) &= I(A(x), B(y)) \text{ (función de implicación)} \end{aligned} \quad (30)$$

2.4. REGLAS DE INFERENCIA O RAZONAMIENTO

Las reglas son un modo de representar estrategias o técnicas apropiadas cuando el conocimiento proviene de la experiencia o de la intuición (careciendo de de postración matemática o física) que usan conectores lingüísticos SI—ENTONCES (IF—THEN):

SI < antecedente o condición > ENTONCES < consecuente o conclusión >

$$\text{SI } x \text{ es } A \text{ ENTONCES } y \text{ es } B \quad (31)$$

Es decir, lo que se busca es una relación difusa R cuya función de pertenencia exprese el grado de verdad de “SI x es A ENTONCES y es B”.

A esta acción se la denomina “implicar”, y hay muchas formas de hacerlo. Implicar es el paso previo a “inferir”, que consiste en extraer una conclusión a partir de la relación generada por la implicación y de un conjunto difuso de entrada “x es A”=A. Dicha conclusión es un nuevo conjunto difuso “y es B”= B.

En otras palabras, el enunciado (31) se interpreta como una relación difusa definida sobre $X \times Y$ (donde \times es un producto cartesiano) en tres etapas:

1. Antecedente, parte que viene después del SI y antes del ENTONCES “x es A” se interpreta con el conjunto difuso

$$A = \sum_{x \in X} \mu_A(x) / x \quad (32)$$

Donde el operador “/” denota una dupla, y los elemento a sumarse son la grados de pertenencia; el significado de este operador es el mismo para las dos etapas siguientes.

2. Consecuente, parte que viene después del ENTONCES “y es B” se interpreta con el conjunto difuso.

$$B = \sum_{y \in Y} \mu_B(y) / y \quad (33)$$

3. Condicionante ENTONCES se interpreta a partir de la relación difusa

$$R = \sum_{(x,y) \in X \times Y} \mu_R(x * y) / (x * y) \quad (34)$$

Con $\mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y)$ donde $*$ es un operador de implicación difusa.

A todo este proceso se le denomina inferencia.

3. CONTROL DIFUSO

3.1. CONTROLADORES EN GENERAL

En general los objetivos de los controladores son los siguientes:

- 1) Mantener unos parámetros de un proceso dentro de unos rangos o regímenes de variaciones normales o tolerables.
- 2) A veces optimización del proceso.

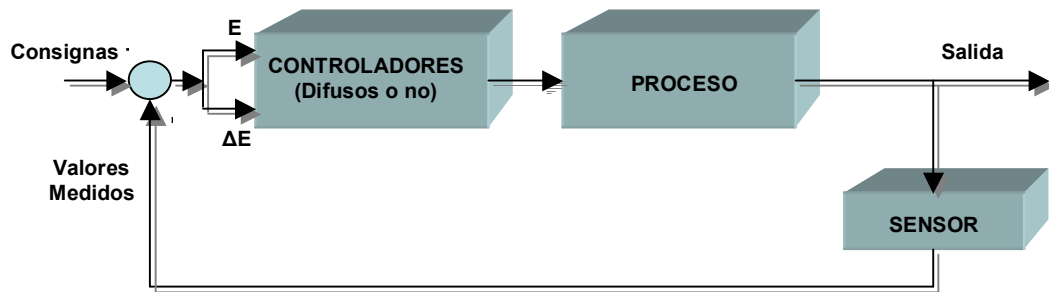


FIGURA 15. Lazo de control realimentado

En este diagrama, la **consigna** es el valor deseado para el parámetro del proceso. Por ejemplo, en un termostato para regular la temperatura de una habitación, la consigna es la temperatura que la persona introduce en el termostato utilizando la rueda que suele tener el mismo. En un momento determinado la temperatura deseada podría ser 15°.

En los sistemas reales habrá varios parámetros que se desea controlar (presión en una membrana, temperatura en el interior de una caldera, temperatura del agua de la tubería de refrigeración), en este tema **se considerará un sólo parámetro**. En el sistema el parámetro que se quiere controlar tendrá un valor que se puede medir directamente mediante un sensor. En general no coincidirá con el valor deseado (consigna) y esa diferencia será la que haga al controlador tomar alguna medida. El resultado de la medición consiste en un **error** (E) y la **variación en el error** (ΔE) que es la medida de si el error aumenta o disminuye y cómo. En el caso de la temperatura, en el instante en el que la consigna es 15° , E podría ser 3° y ΔE podría indicar $+0.5^\circ / \text{sg}$ (es decir, se aumenta el error en medio grado cada segundo). Como consecuencia de esas dos medidas (E indica lo que lo que el sistema se aleja de la consigna y ΔE indica cómo se está acercando) el controlador toma una **acción de control** (C). En el caso de la temperatura, podría ser “disminuir la potencia de la calefacción”.

Una vez que se ejerce la acción de control, se vuelve a medir en el sensor la información sobre la que se está actuando y comienza de nuevo el ciclo.

3.2. CONTROLADORES DIFUSOS EN PARTICULAR

En general, los controladores difusos son sistemas expertos que emplean el conocimiento como fundamento, expresado en términos de reglas difusas y de un proceso de inferencia para resolver un problema de control dado.

Los controladores difusos a diferencia de los controladores clásicos, son capaces de utilizar el conocimiento obtenido de operadores humanos. El conocimiento de un operador humano puede ser utilizado como una alternativa para un modelo preciso de un proceso controlado.

Mientras este conocimiento es complicado de expresar en términos precisos, una descripción lingüística imprecisa de la forma en que se realiza el control puede usualmente ser articulada por el operador con relativa facilidad. Esta descripción lingüística consiste de un conjunto de reglas que hacen uso de proposiciones difusas.

En general, un controlador difuso está formado por cuatro módulos: una base de reglas difusas, un proceso de inferencia de reglas, un módulo denominado fuzzyficación y uno denominado defuzzyficación. Las interconexiones entre estos módulos y el proceso principal son mostradas en la figura (16).

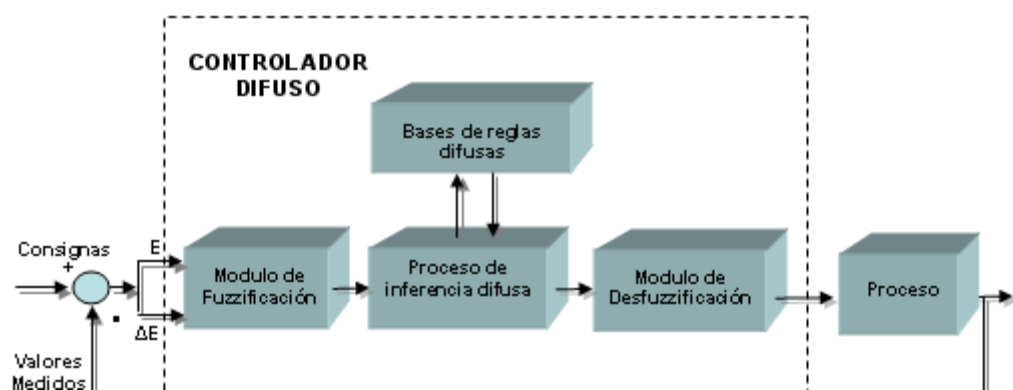


FIGURA 16. Lazo de control realimentado usando un controlador difuso

Un controlador difuso opera por repetición de un ciclo de los siguientes cuatro pasos:

- 1.- Las mediciones de todas las variables que representan condiciones relevantes del proceso controlado son realizadas.
- 2.- Las mediciones son convertidas en conjuntos difusos apropiados para expresar mediciones insuficientes.
- 3.- El paso anterior es llamado fuzzyficación. Las mediciones fuzzyficadas son usadas por el proceso de inferencia para evaluar las reglas de control almacenadas en las base de reglas difusas. El resultado de esta evaluación es un conjunto difuso (o varios conjuntos difusos) definido sobre el universo de posibles acciones.
- 4.- El conjunto difuso encontrado en el paso 3 es convertido en el último paso del ciclo, es decir, se convierte el conjunto difuso en un solo valor (crisp) o en un vector de valores. Esta conversión es llamada defuzzyficación. Los valores defuzzyficados representan acciones de control tomadas por el controlador difuso.

3.2.1. FUZZIFICACION

La fuzzyficación (codificación) traduce a valores difusos los valores de las variables de entrada (del controlador), Es decir su misión es, puesto que en general, los sistemas de control de procesos se enclavan en un ámbito en el que el conocimiento es preciso... es necesario transformar esa información precisa a borrosa para aplicar el controlador. Obtener los grados de pertenencia de la variables E y ΔE a una serie de conjuntos borrosos. Los conjuntos borrosos más utilizados son:

- PG.- positivo grande.
- PP.- positivo pequeño.
- ZE.- cero.
- NP.- negativo pequeño.
- NG.- negativo grande.

Aunque se puede utilizar un número mayor de conjuntos para conseguir mayor granularidad. El resultado de esta fase consiste en tantos valores como conjuntos borrosos se consideren para cada una de las dos variables obtenidas en la fase de medición.

En el caso del termostato, donde E significa “diferencia entre la temperatura indicada en el termostato y la temperatura real de la habitación” y ΔE significa “la

velocidad con la que la temperatura real de la habitación diverge o converge a la temperatura indicada en el termostato”, el resultado de la fase de fuzzificación tendría el siguiente significado:

- $\mu_{PG}(E)$ (diferencia entre las temperaturas del termostato y de la habitación) en qué medida la temperatura real de la habitación es mucho mayor que la indicada en el termostato.
- $\mu_{PP}(E)$ (diferencia entre las temperaturas del termostato y de la habitación) en qué medida la temperatura real de la habitación es no mucho mayor que la indicada en el termostato.
- $\mu_{ZE}(E)$ (diferencia entre las temperaturas del termostato y de la habitación) en qué medida la temperatura real de la habitación coincide con la indicada en el termostato.
- $\mu_{NP}(E)$ (diferencia entre las temperaturas del termostato y de la habitación) en qué medida la temperatura real de la habitación no es mucho menor que la indicada en el termostato.
- $\mu_{NG}(E)$ (diferencia entre las temperaturas del termostato y de la habitación) en qué medida la temperatura real de la habitación es mucho menor que la indicada en el termostato.

- $\mu_{PG}(\Delta E)$ (velocidad con la que las temperaturas del termostato y de la habitación se separan) en qué medida la temperatura real de la habitación se aleja muy rápidamente de la indicada en el termostato.
- $\mu_{PP}(\Delta E)$ (velocidad con la que las temperaturas del termostato y de la habitación se separan) en qué medida la temperatura real de la habitación se aleja muy lentamente de la indicada en el termostato.
- $\mu_{ZE}(\Delta E)$ (velocidad con la que las temperaturas del termostato y de la habitación se separan) en qué medida la temperatura real de la habitación no varía respecto a la indicada en el termostato (independientemente de que sea la misma o no, no hay variación entre ellas).
- $\mu_{NP}(\Delta E)$ (velocidad con la que las temperaturas del termostato y de la habitación se separan) en qué medida la temperatura real de la habitación se acerca lentamente a la indicada en el termostato.
- $\mu_{NG}(\Delta E)$ (velocidad con la que las temperaturas del termostato y de la habitación se separan) en qué medida la temperatura real de la habitación se acerca muy rápidamente a la del termostato.

3.2.1.1. VENTAJAS DE LA FUZZYFICACIÓN:

- Permite minimizar posibles cambios pequeños en las variables de entrada. Por ejemplo, si medimos 25 °C de temperatura, ésta puede variar mientras se

efectúa la inferencia, por lo que puede ser más exacto considerar que la temperatura es “aproximadamente 25 °C”.

- Permite minimizar los posibles errores al tomar los datos.
- Permite suavizar el comportamiento del sistema ampliando el rango de influencia de la variable.

3.2.2. BASE DE REGLAS

Son fragmentos de conocimiento expresado de forma explícita necesarios para solucionar el problema del dominio que ese sistema basado en el conocimiento aborda.

Las reglas de la base de reglas son de la forma:

SÍ... ENTONCES

Ligando las variables E y ΔE utilizadas para tomar una acción de control con la variable C que es la acción concreta. La manera de ligar esas variables consiste en formar proposiciones respecto a la pertenencia de las variables a los conjuntos borrosos utilizados. Para ello se necesita también definir las funciones de pertenencia de la variable C a los conjuntos borrosos que se considere necesarios para la acción de control.

Siguiendo con el ejemplo, puesto que C significa “disminuir o aumentar la potencia de la calefacción” las Anteriores funciones de pertenencia tendrían los siguientes significados:

- $\mu_{PG}(C)$ (disminución de la potencia de la calefacción) en qué medida la disminución de la potencia de la calefacción será muy grande.
- $\mu_{PP}(C)$ (disminución de la potencia de la calefacción) en qué medida la disminución de la potencia de la calefacción será pequeña.
- $\mu_{ZE}(C)$ (disminución de la potencia de la calefacción) en qué medida la potencia de la calefacción quedará estable.
- $\mu_{NP}(C)$ (disminución de la potencia de la calefacción) en qué medida el aumento de la potencia de la calefacción será pequeño.
- $\mu_{NG}(C)$ (disminución de la potencia de la calefacción) en qué medida el aumento de la potencia de la calefacción será muy grande.

La interpretación intuitiva que tendría la regla que se ha puesto como ejemplo concreto al final del punto anterior sería la siguiente: **SI** la diferencia entre la temperaturas del termostato y de la habitación es negativa y pequeña Y la velocidad con la que las temperaturas del termostato y de la habitación se alejan es positiva y pequeña **ENTONCES** la calefacción debe aumentarse de forma grande. Dicho de otra forma más cercana al lenguaje natural: **SI** la temperatura real de la habitación es un poco más pequeña que la indicada en el termostato (error negativo y pequeño) Y se está haciendo más pequeña lentamente (la

variación en el error es positiva y pequeña) **ENTONCES** debe aumentarse bastante la potencia de la calefacción.

Por tanto, en un caso general en el que las variables pudiesen pertenecer a los siguientes números de conjuntos borrosos posibles:

- La que se distribuye por columnas (ΔE) n .
- La que se distribuye por filas (E) m .
- La que ocupa las casillas (C) r .

Se tendrá una matriz $M_{m \times n}$ cada uno de cuyos elementos toma uno de r posibles valores. En el caso que estamos analizando como ejemplo, podríamos encontrarnos con la siguiente representación de una base de conocimiento:

E/ ΔE	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	NG	NG		NP	ZE
NP	NG	NG	NP	PG	PP
ZE		NP	ZE	PP	PG
PP	NP	ZE	PP	PG	PG
PG		PP	PG	PG	PG

TABLA 3. Formato de organización de la base de reglas

3.2.2.1. OBJETIVOS PRINCIPALES DE LA BASE DE REGLAS

- Proporciona las definiciones necesarias para determinar las reglas lingüísticas de control y manipulación de los datos difusos del controlador.

- Almacena los objetivos y la política de control (como un experto en el dominio).

3.2.3. PROCESO DE INFERENCIA DIFUSA

Es el núcleo del controlador difuso: Infiere las acciones de control simulando el proceso de decisión humano usando una implicación difusa y las reglas de inferencia de la lógica difusa.

Utiliza las técnicas de los Sistemas Basados en Reglas para la inferencia de los resultados.

3.2.4. DESFUZZIFICACION

Por la misma razón anterior, las acciones de control tendrán que manipular dispositivos en función de una serie de variables cuyos valores serán nítidos, el controlador, sin embargo, ofrece como respuesta el valor de una función de pertenencia difusa... será necesario transformar esa información difusa en una nítida “equivalente” para que el sistema pueda ser manipulado. Se trata de obtener una información nítida con la que manipular el entorno desde la información borrosa de la acción de control. Se suele traducir a un valor numérico que será la acción de control que finalmente se realice. Algunos mecanismos de desfuzzificación son:

➤ MAXIMO

$$y = \text{Sup}_{y \in Y} (\mu_A(y)) \quad (35)$$

➤ Centro de Media

$$y = \frac{\sum_{m=1}^M y_n * \mu_{A_n^m}(y_n)}{\sum_{m=1}^M \mu_{A_n^m}(y_n)} \quad (36)$$

➤ Centro de media modificado

$$y = \frac{\sum_{m=1}^M y_n * \frac{\mu_{A_n^m}(y_n)}{\sigma_n}}{\sum_{m=1}^M \frac{\mu_{A_n^m}(y_n)}{\sigma_n}} \quad (37)$$

Donde σ_n es la media de los datos de entrada la cual esta dada por:

$$\sigma_n = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n + \dots + y_N}{N} \quad (38)$$

➤ Centro de gravedad

$$y = \frac{\int y_n * \text{máx}_m [\mu_{A_n^m}(y_n)] dy}{\int_y \text{máx}_m [\mu_{A_n^m}(y_n)] dy} \quad (39)$$

➤ Centro de suma

$$y = \frac{\int_y y_n * \sum_{m=1}^M [\mu_{A_n^m}(y_n)] dy}{\int_y \sum_{m=1}^M [\mu_{A_n^m}(y_n)] dy} \quad (40)$$

3.3. TIPOS DE CONTROLADORES DIFUSOS

Los controladores difusos se pueden clasificar en dos tipos:

- 1.- Controlador tipo Mamdani.
- 2.- Controlador tipo Takagi-Sugeno.

La principal diferencia entre estos controladores radica en la consecuencia de las reglas. Para el controlador tipo Mamdani esta consecuencia es un conjunto difuso y para el tipo Takagi-Sugeno es una función lineal de las entradas.

3.4. EJEMPLO DE UN CONTROLADOR DIFUSO

Se desea diseñar un controlador difuso para controlar el nivel de tanque de la figura 17, las consideraciones para dicho control son las siguientes:

- El rango de medida del sensor es de 0 a 20 mt
- La válvula de control tiene un rango de entrada de 0 a 24Vdc (0Vdc la válvula esta totalmente cerrada y 24vdc esta totalmente abierta)
- El *set point* es de 10 mt

➤ Altura máxima del tanque es 20mt

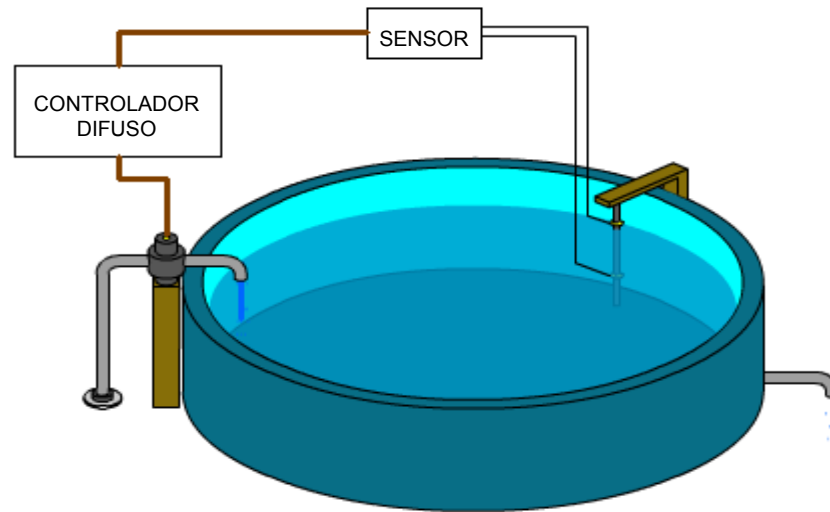


FIGURA 17. Representación grafica del proceso el cual se desea controlar el nivel

A continuación se definen los conjuntos de pertenencia:

ERROR

Se selecciona el universo del discurso del error entre $[-10\ 10]$ debido que $\pm 10\text{mt}$ es el máximo error que se puede obtener en el proceso.

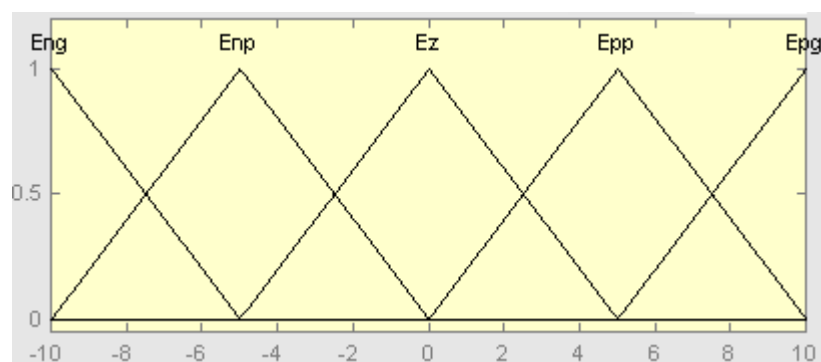


FIGURA 18. Conjunto difuso del error.

De acuerdo a la grafica las expresiones analíticas se dan de la siguiente forma:

$$\mu_{NG}(E) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq -10 \\ -1 - \frac{x}{5} & \text{si } -10 < x \leq -5 \\ 0 & \text{si } -5 < x \end{cases} \quad (41)$$

$$\mu_{NP}(E) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -10 \\ \frac{x+10}{5} & \text{si } -10 < x \leq -5 \\ -\frac{x}{5} & \text{si } -5 < x \leq 0 \\ 0 & \text{si } 0 < x \end{cases} \quad (42)$$

$$\mu_{ZE}(E) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -5 \\ \frac{x+10}{5} - 1 & \text{si } -5 < x \leq 0 \\ 1 - \frac{x}{5} & \text{si } 0 < x \leq 5 \\ 0 & \text{si } 5 < x \end{cases} \quad (43)$$

$$\mu_{pp}(E) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0 \\ \frac{x+10}{5} - 2 & \text{si } 0 < x \leq 5 \\ 2 - \frac{x}{5} & \text{si } 5 < x \leq 10 \\ 0 & \text{si } 10 < x \end{cases} \quad (44)$$

$$\mu_{PG}(E) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 5 \\ \frac{x+10}{5} - 3 & \text{si } -5 < x \leq 10 \\ 1 & \text{si } 10 < x \end{cases} \quad (45)$$

DERIVADA DE ERROR

Se selecciona el universo del discurso de la derivada del error entre $[-0.2 \ 0.2]$ debido que la velocidad de cambio del error es $\pm 0.2 \text{ mt/min}$, es decir el cambio de 1 mt de la medida del proceso con la válvula totalmente abierta se realiza en 5 minutos.

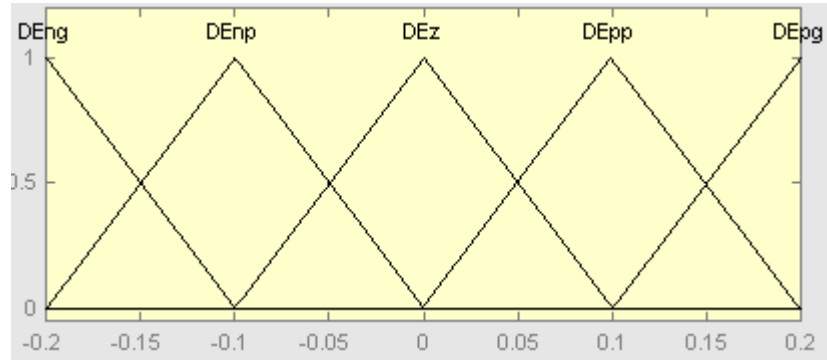


FIGURA 19. Conjunto difuso de la derivada del error.

De acuerdo a la grafica las expresiones analíticas se dan de la siguiente forma:

$$\mu_{NG}(\Delta E) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq -0.2 \\ \frac{-0.1 - x}{0.1} & \text{si } -0.2 < x \leq -0.1 \\ 0 & \text{si } -0.1 < x \end{cases} \quad (46)$$

$$\mu_{NP}(\Delta E) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -0.2 \\ \frac{x + 0.2}{0.1} & \text{si } -0.2 < x \leq -0.1 \\ \frac{-x}{0.1} & \text{si } -0.1 < x \leq 0 \\ 0 & \text{si } 0 < x \end{cases} \quad (47)$$

$$\mu_{ZE}(\Delta E) = \begin{cases} 0 & si \quad x \leq -0.1 \\ \frac{x+0.1}{0.1-x} & si \quad -0.1 < x \leq 0 \\ \frac{0.1}{0.1-x} & si \quad 0 < x \leq 0.1 \\ 0 & si \quad 0.1 < x \end{cases} \quad (48)$$

$$\mu_{PP}(\Delta E) = \begin{cases} 0 & si \quad x \leq 0 \\ \frac{x}{0.1} & si \quad 0 < x \leq 0.1 \\ \frac{0.1}{0.2-x} & si \quad 0.1 < x \leq 0.2 \\ 0 & si \quad 0.2 < x \end{cases} \quad (49)$$

$$\mu_{PG}(\Delta E) = \begin{cases} 0 & si \quad x \leq 0.1 \\ \frac{x-0.1}{0.1} & si \quad 0.1 < x \leq 0.2 \\ 1 & si \quad 0.2 < x \end{cases} \quad (50)$$

SALIDA DE LA VALVULA

El universo del discurso de la salida de la válvula es de [-6 30] debido a que la válvula tiene un rango de entrada de 0 24Vdc.

El universo del discurso de la salida de la válvula no se seleccionó de 0 a 24 debido a que en los conjuntos difusos los valores extremos nunca se podrían dar en la salida ya que se usa para la desfuzzificación el método del centro de gravedad y por tal motivo nunca se obtendría la válvula totalmente cerrada (0 Vdc) o totalmente abierta (24Vdc).

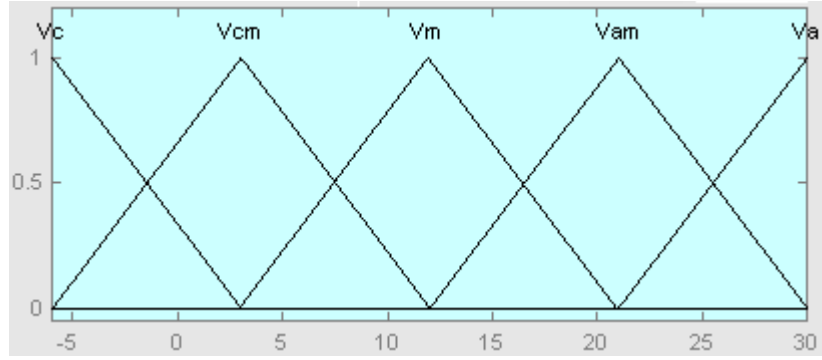


FIGURA 20. Conjunto difuso de la salida.

$$\mu_c(V) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq -6 \\ \frac{3-x}{9} & \text{si } -6 < x \leq 3 \\ 0 & \text{si } 3 < x \end{cases} \quad (51)$$

$$\mu_{cm}(V) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq -6 \\ \frac{x+6}{9} & \text{si } -6 < x \leq 3 \\ \frac{12-x}{9} & \text{si } 3 < x \leq 12 \\ 0 & \text{si } 12 < x \end{cases} \quad (52)$$

$$\mu_m(V) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 3 \\ \frac{x-3}{9} & \text{si } 3 < x \leq 12 \\ \frac{21-x}{9} & \text{si } 12 < x \leq 21 \\ 0 & \text{si } 21 < x \end{cases} \quad (53)$$

$$\mu_{am}(V) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 12 \\ \frac{x-12}{9} & \text{si } 12 < x \leq 21 \\ \frac{30-x}{9} & \text{si } 21 < x \leq 30 \\ 0 & \text{si } 30 < x \end{cases} \quad (54)$$

$$\mu_a(V) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 21 \\ \frac{x-21}{9} & \text{si } 21 < x \leq 30 \\ 1 & \text{si } 30 < x \end{cases} \quad (55)$$

Se consideran las siguientes bases de reglas:

E/ΔE	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	C	C	C	CM	CM
NP	CM	CM	CM	M	M
ZE	M	M	AM	AM	AM
PP	AM	AM	AM	A	A
PG	A	A	A	A	A

TABLA 4. Base de reglas.

Entonces los valores que determina el sistema para los valores de entrada son:

Error = -4

Derror = 0.12

La solución será:

Paso 1. **FUZZIFICACIÓN** Si se aplican las funciones de pertenencia de las figuras anteriores se obtiene:

$$\mu_{NG}(E) = 0 \quad (56)$$

$$\mu_{NP}(E) = -\frac{x}{5} = -\frac{-4}{5} = 0.8 \quad (57)$$

$$\mu_{ZE}(E) = \frac{x+10}{5} - 1 = \frac{-4+10}{5} - 1 = 0.2 \quad (58)$$

$$\mu_{pp}(E) = 0 \quad (59)$$

$$\mu_{PG}(E) = 0 \quad (60)$$

$$\mu_{NG}(\Delta E) = 0 \quad (61)$$

$$\mu_{NP}(\Delta E) = 0 \quad (62)$$

$$\mu_{ZE}(\Delta E) = 0 \quad (63)$$

$$\mu_{PP}(\Delta E) = \frac{0.2 - x}{0.1} = \frac{0.2 - 0.12}{0.1} = 0.8 \quad (64)$$

$$\mu_{PG}(\Delta E) = \frac{x - 0.1}{0.1} = \frac{0.12 - 0.1}{0.1} = 0.2 \quad (65)$$

Paso 2. Calculo de los valores de activación

Para cada regla se elige el menor de los valores devuelto por las funciones de pertenencia para los elementos de su antecedente y se obtiene la siguiente tabla:

E/ ΔE	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	0	0	0	0	0
NP	0	0	0	0.8	0.2
ZE	0	0	0	0.2	0.2
PP	0	0	0	0	0
PG	0	0	0	0	0

TABLA 5. Activación de la base de reglas.

Tan sólo las cuatro casillas no nulas representan reglas que se disparan. Las reglas son las siguientes:

$$E_{ZE} = 0.2 \text{ y } DE_{PG} = 0.2 \longrightarrow V_{AM} = \min[\mu_A(X), \mu_B(Y)] = \min[0.2, 0.2] = 0.2$$

$$E_{ZE} = 0.2 \text{ y } DE_{PP} = 0.8 \longrightarrow V_{AM} = \min[\mu_A(X), \mu_B(Y)] = \min[0.2, 0.8] = 0.2$$

$$E_{NP} = 0.8 \text{ y } DE_{PG} = 0.2 \longrightarrow V_M = \min[\mu_A(X), \mu_B(Y)] = \min[0.8, 0.2] = 0.2$$

$$E_{NP} = 0.8 \text{ y } DE_{PP} = 0.8 \longrightarrow V_M = \min[\mu_A(X), \mu_B(Y)] = \min[0.8, 0.8] = 0.8$$

Paso 3. Disparos de las reglas

En lo concerniente a las reglas con el mismo consecuente, las dos primeras reglas tienen como consecuente V debe ser AM y las dos ultimas V deben ser M. En este caso, se tiene la siguiente regla:

SI (E es ZE y Δ E es PG) o

(E es ZE y Δ E es PP)

Entonces V debe ser AM

SI (E es NP y Δ E es PG) o

(E es NP y Δ E es PP)

Entonces V debe ser M

Como se está utilizando como t-norma el mínimo, utilizamos como t-conorma el máximo y el resultado es el máximo de la aplicación de las 2 de cada una de las regla

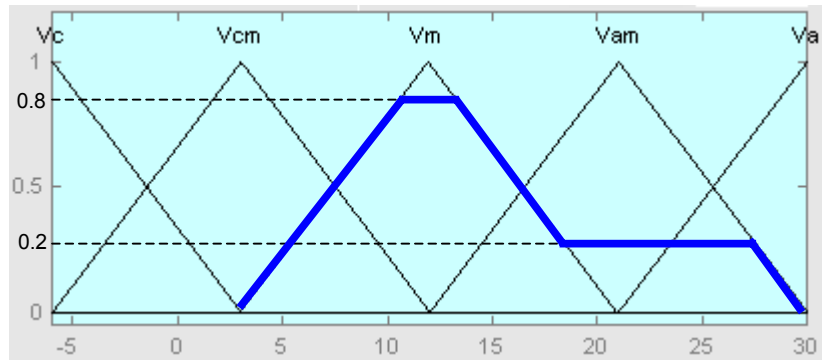


FIGURA 21. Grafica del resultado difuso del controlador.

La expresión analítica de la función resultado es la siguiente:

$$\mu_{(C/e)}(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 3 \\ \frac{x-3}{9} & \text{si } 3 < x \leq 10.2 \\ 0.8 & \text{si } 10.2 < x \leq 13.8 \\ \frac{21-x}{9} & \text{si } 13.8 < x \leq 19.2 \\ 0.2 & \text{si } 19.2 < x \leq 28.2 \\ \frac{30-x}{9} & \text{si } 28.2 < x \leq 30 \\ 0 & \text{si } 30 < x \end{cases} \quad (66)$$

Donde x es el valor numérico nítido de la acción de control C.

Paso 4. **Desfuzzificación.**

Según la expresión analítica anterior, se tiene que realizar los siguientes cálculos para obtener el valor nítido (valor de abscisa) del centro de gravedad de la región rodeada por la función de pertenencia

$$\int_{DOM(X)} x \cdot f(x) dx = \int_3^{10.2} \frac{(x-3)}{9} \cdot x dx + \int_{10.2}^{13.8} 0.8 \cdot x dx + \int_{13.8}^{19.2} \frac{(21-x)}{9} \cdot x dx + \int_{19.2}^{28.2} 0.2 \cdot x dx + \int_{28.2}^{30} \frac{(30-x)}{9} \cdot x dx$$

$$= 22.464 + 34.576 + 43.092 + 42.66 + 5.184 = 147.976$$

$$\int_{DOM(X)} f(x) dx = \int_3^{10.2} \frac{(x-3)}{9} dx + \int_{10.2}^{13.8} 0.8 dx + \int_{13.8}^{19.2} \frac{(21-x)}{9} dx + \int_{19.2}^{28.2} 0.2 dx + \int_{28.2}^{30} \frac{(30-x)}{9} dx$$

$$= 2.88 + 2.88 + 2.38 + 1.8 + 0.18 + 2.38 = 10.2$$

Donde el centro de gravedad o salida del controlador es $X_G = \frac{147.976}{10.12} = 14.6 \text{ Vdc}$

3.5. NUEVAS TENDENCIA DEL CONTROL DIFUSO

Las nuevas tendencia al control difuso son la de diseñar controladores capaces de auto sintonizarse con las condiciones del proceso de tal modo a nacido una rama en el control inteligente llamada controladores *NEURO – FUZZY* la cual la especificamos a continuación, las demás técnicas de control difuso adaptativos lo dejamos como tema de investigación para el lector.

3.5.1. REDES NEURO-DIFUSAS (*NEURO-FUZZY SYSTEMS*)

Las redes neuro-difusas son sistemas que incorporan aspectos de las *redes neuronales* en el sentido de que son sistemas con la capacidad de aprender y generalizar, y aspectos de la *lógica difusa*, dado que trabajan con razonamientos lógicos basados en reglas de inferencia, incorporan la posibilidad de trabajar con

variables lingüísticas (si el problema lo requiere) y, además, cambian el tratamiento binario del problema de que hacen las *redes neuronales artificiales* (ANN) por un tratamiento difuso. Lo primordial es hacer una buena selección de las *reglas If-Then* para un *Sistema de Inferencia Difuso* (*Fuzzy Inference System*) que permite modelar el conocimiento experto humano para una aplicación específica. Eso sí, un *Sistema de Inferencia Difuso* carece de la adaptabilidad necesaria para cambiar cuando se modifiquen las condiciones externas. Por ello, se incorporan conceptos del aprendizaje de las *Redes Neuronales Artificiales* a los *Sistemas de Inferencia Difusos*, cuyo resultado es un nuevo tipo de topologías conocidas como *Redes Neuro-Difusas*.

3.5.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES NEURO-DIFUSAS

Las redes neurodifusas tienen fundamentalmente las siguientes características:

- 1) Conocimiento humano: se utiliza en forma de reglas *If -Then* para solucionar problemas reales.
- 2) Inspiración en modelos biológicos: inspiradas por las redes neuronales biológicas, las Redes Neuronales Artificiales son el pilar fundamental y básico para las Redes Neuronales Difusas, permitiendo tratar con problemas de percepción, reconocimiento de patrones o clasificación.

- 3) Computación numérica: la computación es básicamente numérica, aunque la perspectiva futura apunta hacia una computación simbólica más cercana a la Inteligencia Artificial.
- 4) Diversos dominios de aplicación: procesamiento adaptativo de señales, control adaptativo, identificación de sistemas no lineales, regresión no lineal, reconocimiento de patrones, etc.
- 5) Aprendizaje libre de modelos: las reglas se obtienen a partir de los datos numéricos.
- 6) Computación intensiva: sin asumir un conocimiento a priori del problema, las Redes Neuronales Difusas dependen mucho de una computación intensiva que permita encontrar reglas o cualquier tipo de regularidad en conjuntos de datos.
- 7) Tolerancia a fallos: tanto las Redes Neuronales Artificiales como los Sistemas de Inferencia Difusos tienen tolerancia a fallos. La supresión de una neurona en una Red Neuronal Artificial o de una regla en un Sistema de Inferencia Difuso, no tiene por qué destruir el sistema. En realidad, el sistema continúa trabajando debido a su arquitectura paralela y redundante aunque se va deteriorando gradualmente.
- 8) Distintos caminos para alcanzar el mínimo: se puede llegar al mínimo error por diversos caminos. De hecho, esto no es lo importante en la medida en que el sistema vaya acercándose hacia el mínimo.
- 9) Muy indicadas en la resolución de problemas

4. APLICACIONES INDUSTRIALES DEL CONTROL DIFUSO

4.1. ANTECEDENTES

Durante los últimos 20 años la lógica difusa ha demostrado su gran potencial en aplicaciones de automatización industrial y si bien es cierto que las técnicas convencionales de control tales como el PID son muy usadas en la actualidad (por no decir lo mas utilizados) y han dado resultados óptimos en ciertos procesos industriales, en otros procesos que son altamente no lineales, ésta técnica de control no resulta ser la opción mas indicada.

Mientras que los controladores tipo PID trabajan bien cuando el proceso bajo control se encuentra en una condición estable, hay casos en los cuales su rendimiento no es el idóneo, tales son:

- La presencia de fuertes perturbaciones (no linealidad)
- Parámetros del proceso que varían con el tiempo (no linealidad)
- Presencia de tiempos muertos

La razón de esta falta de rendimiento es porque el controlador PID asume que el proceso se comporta bajo una modalidad estrictamente lineal. Mientras que esta suposición se puede hacer en una condición de estabilidad, fuertes perturbaciones pueden empujar el punto de operación del proceso muy lejos de su punto de referencia. Es en este caso donde esta suposición de linealidad deja de ser válida.

Lo mismo sucede si el proceso cambia sus parámetros a través del tiempo. En estos casos, el hacer un complemento del PID con controladores fuzzy o reemplazarlos por éstos ha demostrado ser una mejor solución que usar sofisticados controladores de estado. Sin embargo, este no es la única área donde la lógica difusa basa su alto potencial de soluciones.

El real potencial de la lógica difusa en la automatización industrial se basa en el diseño de controladores multivariables. En muchas aplicaciones, mantener una sola variable constante puede ser alcanzado usando un controlador PID. Sin embargo, los valores de referencia para todos los lazos de control individuales son usualmente puestos de forma manual por los operadores. Los operadores analizan las condiciones del proceso, y sintonizan los valores de referencia del controlador PID para optimizar su operación. Esto es lo que se llama control supervisado y la mayoría incluye múltiples variables.

Como ya se mencionó anteriormente el controlador PID regula muy bien una sola variable, lo cual da como resultado un alto grado de independencia entre los lazos de control que estén operando. Entonces en casos donde se desea o es necesario explotar las interdependencias de variables físicas, se forja a realizar un modelo matemático completo del proceso de tal forma que se puedan obtener las ecuaciones diferenciales que permitan la implementación de una solución, y en el campo de la automatización esto a veces resulta un poco complicado, pues el modelado matemático de un problema de la vida real puede llevar años de trabajo

y se hace necesario grandes simplificaciones y linealizaciones. Además al momento de sintonizar los controladores se puede presentar que mientras se optimiza un punto de operación usando factores globales se puede degradar la operación en otro punto del sistema.

Es en este contexto donde la lógica difusa provee una buena y muy eficiente solución al problema. La lógica difusa le permite a los ingenieros diseñar controladores supervisores multivariables basándose en la experiencia del operador y en resultados de experiencias en vez de pensar en términos de un modelo matemático, bien sea por que es muy difícil o imposible de deducir debido a la gran fluctuación de los parámetros del sistema o porque es tan complejo de procesar y computar los datos en tiempo real que se requeriría procesadores muy costosos.

Una de las soluciones ha sido utilizar el control difuso en aplicaciones como complemento en procesos que son difíciles de controlar solamente con PID, en donde la salida de control es igual a la suma de los términos proporcional, integral, derivativa y difusa. La función de la lógica difusa es “visualizar” todo el proceso y determinar si las señales de control PID están controlando el sistema de forma adecuada, de no ser así, se ajustara la salida. En estos sistemas la lógica difusa reduce los tiempo de respuesta de los procesos hasta en un 50% y puede llegar a disminuir o incluso eliminar el sobre impulso.

4.2. RESEÑA HISTORICA DE LAS APLICACIONES CON CONTROL DIFUSO

Ahora bien, las aplicaciones industriales de la lógica difusa se llevaron a cabo en los años 70's en Europa, dentro de las cuales se pueden mencionar:

- Control de un generador de vapor en el Queen Mary College (Londres), por Ebrahim Mamdani, el cual no se podía controlar con las técnicas convencionales.
- Control de un horno para cementeras.

Sin embargo, la lógica difusa no tuvo una gran aceptación de la industria aun después de que las primeras aplicaciones fueron introducidas. Solo ganó aceptación en los años 80's pero en aplicaciones de análisis de datos y soporte de decisiones. La mayoría de los desarrollos fueron conseguidos a través de investigaciones empíricas que se enfocaban en modelar los procesos de evaluación toma de decisión humanas. Inspiradas por las primeras aplicaciones en Europa de lógica difusa, algunas compañías Japonesas empezaron a aplicar esta lógica a la ingeniería de control en 1980. Pero la falta de computadores de buen rendimiento para desarrollar los algoritmos de lógica difusa los llevó a crear hardware para aplicar esta nueva técnica. Algunas de las primeras aplicaciones en Japón fueron:

- Planta de tratamiento de agua residual por **Fuji Electric** en 1983.

- Un sistema de metro subterráneo por **Hitachi** el cual abrió en 1987, el cual se describe a continuación :

Sendai es la ciudad de mayor tamaño en la parte norte de la isla de Honshu en Japón, con una de las tasas más altas en cuanto a vehículos se refiere. La capacidad de las vías alcanzó su límite en 1965 cuando en las horas picos los buses públicos alcanzaban solo una velocidad de 8km/h dentro de los 10 km del centro de la ciudad. Ante este panorama, las personas a cargo de esta ciudad comenzaron a diseñar un sistema de metro subterráneo que pudiese aliviar el flujo vehicular y brindarle a los ciudadanos mayores niveles de confort, seguridad y eficiencia.

Mientras que se diseñaba el sistema para el subterráneo en Sendai, los ingenieros de Hitachi pasaron varios años tratando de automatizar las operaciones del tren basados en métodos de control industriales convencionales. Durante las pruebas realizadas con estos métodos de control se observó que solo se obtenía una operación satisfactoria cuando se tenía un patrón de velocidad predeterminado pero los problemas surgían al momento de frenar, o ante cambios de velocidad.

Entonces, los ingenieros decidieron observar como el conductor controlaba el tren. Durante la operación de éste, el conductor tomaba decisiones basados en el conocimiento de las rutas y en la comprensión de las características de operación del tren. Sus acciones y decisiones eran aproximaciones de lo que es razonable y

necesario en un intervalo de tiempo particular, en vez de tener una serie de decisiones cuantitativas detalladas. Es entonces cuando los ingenieros deciden basarse en la lógica difusa para implementar el control de este tren., pues esta técnica de control les permitía incorporar el conocimiento de ese conductor y la habilidad de este de procesar información que podía resultar vaga o imprecisa a fin de diseñar un control que cumpliera con los requerimientos. Como resultado, no solo se obtuvo un sistema más sencillo sino que el grado de confort y seguridad mejoro, además de disminuir los costos de forma significativa. Es entonces cuando desde julio 15 de 1987, este tren subterráneo completamente inteligente transporta pasajeros de estación.¹

En 1990, cuando se comprobó el éxito en las aplicaciones de la lógica difusa en la automatización industrial, empresas europeas en especial las alemanas empezaron a interesarse y desarrollar hardware y software en esta nueva técnica de control, se fabricaron PLC's basados en que esta técnica de control los cuales debían integrarse a las técnicas convencionales de automatización.

Entre las aplicaciones mas comunes se encuentra control de temperatura, caso en donde se ve el complemento de PID y fuzzy , control en procesos relacionados con la industria alimenticia, control de procesos químicos los cuales son altamente no lineales, control de grúas, trafico, reactores, plantas de tratamiento de aguas

¹ AUTOMATIC TRAIN OPERATION SYSTEM BASED ON PREDICTIVE FUZZY CONTROL. Hiroyasu Oshima, Seiji Yasunobu, Shin-ichi Sekino.

residuales, en la industria metalúrgica, automotriz entre otros. A continuación se hace una descripción de dichas aplicaciones.

4.3. APLICACIONES INDUSTRIALES

4.3.1. CONTROL DE BRAZOS ROBOTICOS

El control de brazos robóticos con articulaciones pertenece a la clase de problema que incluyen grandes grúas, brazos robóticos en industria, entre otros. El control de los manipuladores mecánicos para que realicen el recorrido deseado es un problema muy importante, y se vuelve más complejo cuando el robot posee muchas articulaciones. Un brazo flexible es un sistema de parámetros distribuidos de orden infinito, pero debido a las limitaciones en computadores, imprecisiones de sensores y ruidos del sistema, se pueden presentar casos de inestabilidad y este debe ser llevado a un sistema de grado menor y controlado por un controlador finito.

4.3.1.1. CONTROL ANTI-BALANCEO EN GRÚAS



FIGURA 22. Foto de grúas de cargas.

En el control de grúas, el objetivo es posicionar la carga sobre un punto específico. Mientras que la carga esta conectada a la grúa a través de cables, esta puede balancearse dentro de ciertos límites mientras es transportada, pero al momento de ser alcanzada la ubicación final este movimiento deber ser reducido casi a cero. Por lo tanto, un controlador debe usar por lo menos dos variables de entrada, como podría ser la posición y el ángulo de balanceo. Sin embargo un controlador de PID no puede ser usado por que esta restringido a una sola entrada. Entonces las soluciones convencionales a este problema requieren altos esfuerzos tales como controladores de variables de estado los cuales requieren muchos recursos de ingeniería y de hardware. Estas tecnologías tienden a incrementar el costo de este tipo de control para grúas lo cual con lleva a que éstas sean operadas manualmente en muchas regiones.

A pesar de las dificultades que implica el tener un control automatizado, los operadores humanos pueden controlar las grúas muy bien en la mayoría de los

casos. Ahora bien, como la lógica difusa es una tecnología que facilita el diseño de un sistema de control el cual se basa directamente en tales experiencias humanas, ha sido usada en la automatización de las grúas por casi 15 años. Los tipos de grúas incluyen aquellas que reciben contenedores en puertos, las utilizadas en las fábricas de acero y aquellas que se usan en un ambiente manufacturero.

Dentro de los diferentes métodos para controlar el balanceo en estas grúas podemos describir el siguiente:

Basándose en el conocimiento que se tiene sobre el comportamiento de estas máquinas, se puede hacer un bosquejo de las reglas que serán implementadas en el controlador. Como se menciona el objetivo principal es que el balanceo de la carga al llegar al punto indicado sea mínimo.

Para esta aplicación se tienen diferentes niveles de competencia los cuales son necesarios para el control de la grúa:

1. Parada de emergencia.
2. Movimientos por el operador usando el panel de control.
3. Parada automática a medida que alcance la ubicación deseada de la carga.
4. Habrán salidas del controlador difuso si el ángulo de balanceo es muy grande
5. Identificación del sitio de ubicación usando un sensor de láser.

Primero que todo, el sistema de control debe ser capaz de parar ante cualquier situación de emergencia. Entonces el operador deberá ser capaz de controlar el movimiento de la carga manualmente usando un joystick conectado al panel de control. El siguiente nivel debe ser la competencia que tiene mas inteligencia y es la de parar automáticamente cuando la carga alcance el limite de su área de trabajo y su punto de ubicación. El siguiente nivel de competencia tiene que ver con la reducción del balanceo cuando la carga esta cerca del blanco siempre y cuando el ángulo de balanceo sea muy grande. El siguiente nivel es bajar la carga en la posición determinada, calculada a partir del sensor. El nivel más alto de competencia es localizar el blanco utilizando un láser y mover la carga a ese punto. Cuando la carga se esta moviendo hacia su posición final y si alguna perturbación se aplica y resulta en la generación de un ángulo muy grande, el sistema de control inhibirá el nivel mas alto del sistema, es decir que la localización automática del blanco será parada. El comportamiento anti balanceo fuzzy entonces tomara acción hasta que el ángulo sea reducido a el limite predefinido.

El control anti balanceo se implementa formulando a un conjunto de reglas fuzzy para reducir el ángulo de balanceo.

El ángulo deseado θ_d es 0. El ángulo actual es θ . El error entre el ángulo deseado y el ángulo actual así como también el cambio en el error son calculados y son las entradas al controlador.

El esquema se muestra en la siguiente figura.

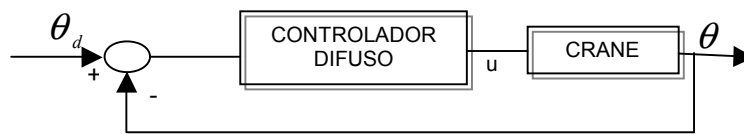


FIGURA 23. Diagrama de bloque del controlador difuso para el sistema de la grúa.

Los valores se dan entre 0 y 1, y se usan 5 funciones de membresía para el error y el cambio en el error. Estas funciones son de forma triangular, como se observa en la siguiente figura:

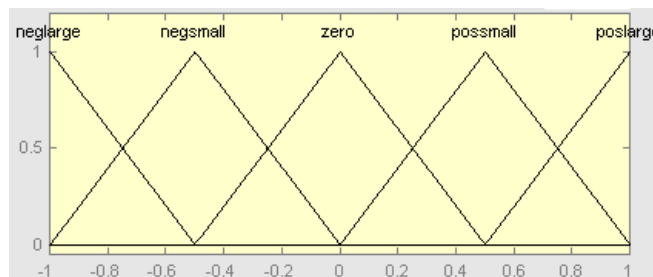


FIGURA 24. Conjunto difuso de las entradas (error y derivada de error) al sistema de la grúa.

Las reglas se resumen en la tabla;

E/ ΔE	poslarge	possmall	zero	negsmall	neglarge
poslarge	NL	NL	NL	NS	ZO
possmall	NL	NL	NS	ZO	PS
zero	NL	NS	ZO	PS	PL
negsmall	NS	ZO	PS	PL	PL
neglarge	ZO	PS	PL	PL	PL

Tabla 6. Tabla de reglas para el sistema de control de la grúa.

Se utiliza el método del centroide para la defuzzificación.

Ahora bien, tres motores son conectados a los controladores de los motores para desplazamiento, agarre, y movimientos transversales de forma simultánea, en las tres dimensiones de la grúa. Tres encoders son conectados a los motores para saber la velocidad de la grúa. Los sensores del *bumper* son usados para tener la información sobre el límite y guiado. Dos *joysticks* se usan en el panel de control. Dos potenciómetros se conectan a la dirección para que suministren la información de balanceo. Un láser y dos sensores son conectados a el y son usados para localizar el blanco.

Cuando cualquiera de los comportamientos de bajo nivel son disparados, los niveles altos son inhibidos. Por ejemplo, si los sensores en los *bumpers* son activados cuando la carga llega a su límite de espacio de trabajo, la grúa parara hasta que el operador la lleve a un punto seguro. Cuando la carga llegue a su blanco automáticamente y si los comportamientos de anti balanceo son activados, el sistema de control reducirá los ángulos de balanceo antes de continuar con el siguiente paso que seria depositarla en su destino final.

El controlador fuzzy se implemento para las tres dimensiones. Como ejemplo de las reglas podemos mencionar:

Cuando el error es positivamente grande y el cambio en el error es positivamente grande, la salida del fuzzy controlador debe ser negativamente grande.²

Hoy por hoy sigue siendo una aplicación de amplio uso en la industria.

4.3.2. APLICACIONES EN TEMPERATURA

4.3.2.1. PID VS. FUZZY

La percepción mas común es que el control de la temperatura es un área lo suficiente madura y sin grandes innovaciones en cuanto a tecnología se refiere. Sin embargo, aún hay aplicaciones industriales (como por ejemplo, fundición de hierro, de vidrio, de moldeo), los cuales no solo desean solo un control preciso de temperatura, sino una fase de calentamiento y una respuesta mas rápida ante perturbaciones con un mínimo sobre impulso cuando se presenten cambios en el set point. Las técnicas del tradicional control PID no puede cumplir con estos requerimientos extra.

² REAL WORLD IMPLEMENTATION OF FUZZY ANTI SWING CONTROL FOR A BEHAVIO BASED INTELLIGENT CRANE SYSTEM. Jiaming Wang, Hao Li, Fakhri Karay y Otman Basir.

Básicamente existen dos direcciones para diseñar controladores de temperatura altamente sofisticados. Una solución esta basada en complementarlo con el tradicional control PID y la otra apunta a diseñar el sistema de control basándose en lógica difusa.

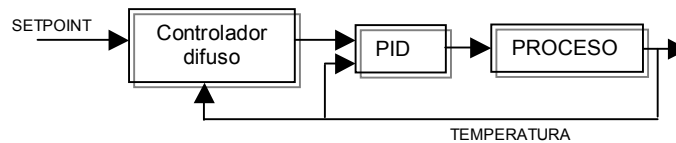


FIGURA 25. Diagrama de bloques que muestra la combinación de un controlador difuso con un PID para controlar procesos de temperatura.

En la figura se puede observar una forma muy común de llevar a cabo el control e temperatura, complementando estas dos técnicas de control.

4.3.2.2. CONTROL DE ZONA DE FUEGO EN PLANTAS INCINERADORAS DE DESPERDICIOS.

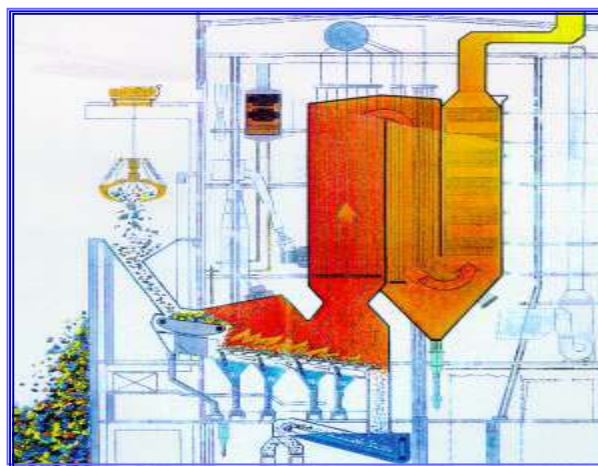


FIGURA 26. Planta de Incineración.

El mantener una temperatura estable durante la incineración de desperdicios en este tipo de plantas es importante para minimizar la generación de gases tóxicos, tales como el dióxido y el furan, y también para evitar la corrosión en las cámaras de incineración. Hay dos dificultades básicas en este control de temperatura:

- El valor calórico del desperdicio fluctúa de forma fuerte.
- La posición y forma de la llama no se puede medir directamente.³

Como el calor generado por este proceso de incineración es utilizado para producir energía eléctrica, la estabilidad de este proceso es también de un alto interés comercial.

La aplicación de lógica difusa en este tipo de plantas en ciudades de Alemania como Hamburgo y Manheim ha resultado exitosa. En una de estas, dos PLC's fuzzy fueron usados para controlar el proceso de incineración, y la generación de vapor de un horno de estos es de 28 Mg/h. Usando un controlador Standard la generación de vapor fluctuaba casi 10Mg/h en espacio de una hora. El controlador fuzzy era capaz de reducir esta variación a monees de +- 1Mg/h. Esto implico que la emisión de NOx y SO2 disminuyeran y que la de CO se redujera hasta la mitad.

³ RECENT SUCCESFULL FUZZY LOGIC APPLICATIONS IN INDUSTRIAL AUTOMATION. Constantin von Altrock, Dr. Jorg Gebhardt.

4.3.2.3. CONTROL DE TEMPERATURA EN MAQUINAS PARA MOLDEAR PLÁSTICO

En la industria de plásticos, el control de la temperatura en las maquinas utilizadas para su moldeo es crucial para obtener una buena consistencia y calidad del producto.

Esto requiere la sintonización de varios algoritmos de control, porque los tiempo muertos que están involucrados en las maquinas de extrusión son significantes y también es importante acoplar las diferentes temperaturas entre las diferentes zonas.

4.3.2.4. CONTROL CLIMÁTICO USANDO LÓGICA DIFUSA

Es una aplicación en donde se pueden generar grandes ahorros de energía.

Las salidas de los controladores fuzzy dan los valores para la válvula del refrigerante, la válvula de agua caliente, y la válvula que regula la humedad. La estrategia de control difusa utiliza diferentes sensores de temperatura y humedad para determinar como deben aportar los procesos de aire acondicionado de manera tal que se ahorre energía. Otra vez, la capacidad de procesar variables interdependientes significa una gran ventaja sobre otras soluciones convencionales. Por ejemplo, la persona sabe que cuando la temperatura se lleva, la humedad del aire descende.

Este tipo de conocimiento puede ser explotado a través de la implementación de una estrategia de control difuso que le permita al controlador de temperatura indicarle al controlador de humedad que va a activar la válvula de calor. El controlador de humedad puede entonces responder a esto antes de poder detectarlo a través de su sensor. Esto da como resultado una mejor calidad en el control.

4.3.3. APLICACIONES EN PROCESOS QUÍMICOS

En la industria química los procesos se caracterizan por tener largos periodos de tiempo muerto (4 a 8 no son inusuales). Pero como la mayoría de las situaciones excepcionales son usualmente manejadas por operadores humanos, es aquí donde se abre un gran potencial para aplicaciones en la lógica difusa, pues el controlador difuso puede tener reglas para esas situaciones excepcionales. La evaluación de datos de los procesos es otro tópico que se explota con esta nueva técnica de control, pues un análisis profundo al comportamiento del procesos puede prever situaciones problemáticas en el futuro, entonces la clasificaciones de situaciones o tendencias puede mejorar el rendimiento del proceso.

Una de las aplicaciones que envuelve procesos químicos en su operación son las plantas de tratamiento de aguas residuales, la importancia de estas radica en que el agua limpia es esencial para la salud, recreación y la protección de la naturaleza, además de ser un requisito legal. El tratamiento de aguas residuales remueve aquellos contaminantes peligrosos del agua que proviene de las

industrias y de las casas, con el fin de poder devolverlas de una forma segura al medio ambiente. La automatización de estas plantas es importante en la medida en que garantizan la calidad del agua tratada, en presencia de condiciones que cambian como el flujo de agua y variaciones de clima.

4.3.3.1. CONTROL DE DOSIFICACIÓN EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los procesos en las plantas de tratamiento de aguas residuales son una combinación tanto de procesos químicos, como biológicos y mecánicos. Esto hace que la realización de un modelo matemático para su control sea muy difícil de llevar a cabo. Sin embargo, se cuenta con una gran cantidad de experiencia humana que puede ser utilizada para realizar un control. De esta forma la experiencia del operador ha permitido que el control fuzzy sea hoy muy utilizado en este tipo de aplicación.

En una planta ubicada en la ciudad de Bonn (Alemania) la dosificación de FeCl_3 líquido para la precipitación de fosfatos ha sido automatizada exitosamente usando un controlador fuzzy. De acuerdo a la legislación, en este caso en Alemania, se requiere que el total de cantidad de fosfato en el agua que se vierte después del proceso sea de 1 miligramo por litro. Para extraer el fosfato del agua, se le añade FeCl_3 , el cual convierte el fosfato en FePO_4 es cual se sedimenta en forma de lodo. Entonces con el fin de evitar penalizaciones a nivel legal los operadores tendían a poner una sobredosis de FeCl_3 en la planta.

Para optimizar las dosificaciones de FeCl_3 , se implemento un controlador fuzzy que recibía como entradas las siguientes variables: concentración de fosfato, su derivada, flujo de agua, su derivada, y contenidos sólidos. La salida de este controlador es el cambio de la variable de referencia para inyectarle FeCl_3 . Un controlador convencional tipo PI estabiliza el flujo de FeCl_3 a su punto e referencia. Este tipo de controlador se implemento como una función en el controlador fuzzy. Este es un ejemplo de la combinación de estas dos técnicas de control.

Como resultado se puede mencionar un ahorro de casi el 50% de FeCl_3 comparado con el control manual que se llevaba a cabo.

4.3.3.2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Estas plantas de tratamiento de residuos usan procesos biológicos (como el desarrollo de bacterias) para purificar el agua contaminada antes de ser descargada a su ambiente natural. La materia orgánica contenida en el agua contaminada es usada por la bacteria para crear sus componentes celulares. La bacteria descarga dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2). El aire es soplado a los tanques. La energía usada para ventilación usualmente es más de la mitad de la energía total consumida por la planta. Entonces, para poder asegurar el desarrollo correcto de la bacteria, las concentraciones de NH_4 y O_2 en los tanques de ventilaciones deben ser cuidadosamente controladas, y de esta manera reducir

en costos de energía, manteniendo el flujo de aire mínimo que cumpla con los requisitos de la planta. .

4.3.3.3. NEUTRALIZACIÓN DEL PH EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En este caso se evalúa el tratamiento que se le puede dar al pH, valiéndose de la combinación del ***fuzzy control*** con las técnicas de control convencional, en este caso PI, y los beneficios que esto traer.

El problema con la neutralización del pH, es que el manejo de ácidos y bases es un procesos altamente no lineal. Además no se sabe con exactitud cuanta cantidad y que tipo de ácido o base esta corriendo a través del canal de agua residual. Lo anterior depende del proceso de la planta química. Esto quiere decir, que es un proceso con grandes fluctuaciones en sus parámetros. Ahora bien debido a las legislaciones que hay con respecto al tema del vertimiento de aguas, solo es posible vertir las aguas que se encuentren en un estado neutralizado, razón por la cual el pH juega un rol tan importante.

El agua residual de la planta química converge a un drenaje. En la primera etapa ésta es preneutralizada, debido a que siempre llega siendo un ácido. En el próximo paso el lodo, aceite o residuos de ese tipo de viscosidad son separados. Entonces se procede a una muy alta neutralización que se divide en varias etapas. En cada etapa de la neutralización, el punto de referencia del pH se va

incrementado por ultimo, el **setpoint** es igual a 7, es decir un Ph neutro. No era posible controlar todas las perturbaciones en el proceso en menos de 3 etapas de neutralización. Cada recinto para neutralizar tiene un sensor de pH. El controlador manipula la posición de la válvula para que fluya la base (NaOH). Hasta hace unos años este valor era controlador con un controlador convencional PI. Así que a continuación se vera los beneficios que trajo consigo la aplicaciones de la lógica difusa a ese tipo de sistema.

La estrategia de control que se utilizo fue la siguiente: Los parámetros de entrada del sistema difuso eran el volumen de agua residual, el valor del proceso y el tipo de ácido (orgánico o inorgánico). Y las salidas de este sistema eran los parámetros de control del controlador PI.

A través de la observación de la ruca de tritación se puede determinar cuanto se debe neutralizar para obtener cierto valor de pH. El rango de operación se subdividido en varios regiones de operación, donde se obtuviera un comportamiento casi lineal por segmento. Con la definición de estas regiones se hicieron las funciones de membresía. Luego para que el controlador PI trabajara de forma optima en cada región se hacían medición de los parámetros. Por ultimo se hicieron las reglas por cada región y como debía realizar el ajuste el controlador PI. Esto produjo un mejor trabajo del controlador pues se procuro que este trabajara con datos de regiones cuyo comportamiento era casi lineal y el comportamiento de la planta mejoro notablemente.

Los beneficios de esta solución son: mayor rapidez en la compensación de las perturbaciones del proceso y la reducción del sobre impulso. Y también se pueden reducir los pasos de neutralización, y por ende ahorrar en costos.

4.3.3.4. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

A continuación se muestra otro caso de una planta de tratamiento de agua residual⁴. La cual consiste en un tanque anaeróbico para residuos biológicos fosforicos, los tanques de bioaireación para nitrificación intermitente y luego desnitrificación son tanques secundarios.

En este caso en especial los objetivos principales son:

- Abastecimiento de oxígeno para los procesos de nitrificación y desnitrificación.
- Remoción de contaminantes.

La planta tiene tres zonas diferentes para remover residuos de nitrógeno y fósforo. Dos de ellas usan aireación intermitente y la otra zona es el tanque anaeróbico. Entonces lo que se busca es poder escoger la mejor decisión entre las dos que hay: tener la aireación encendida o por el contrario apagada. En la figura se puede ver una representación de la planta.

⁴ A FUZZY CONTROL APPLICATION TO WASTE WATER TREATMENT PLANT. Jens Alex, Ulrich Jumar y Ralf Tschepetzki.

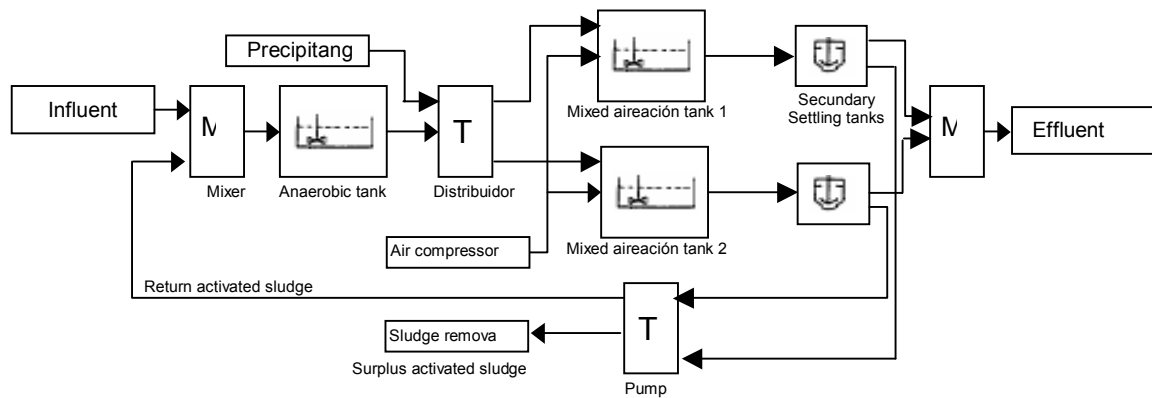


FIGURA 27. Diagrama de bloques de la planta de tratamiento de aguas residuales

Normalmente se utilizaban relés los cuales eran accionados según la concentración de amoníaco. Si la concentración era de 1mg/l la aireación se apagaba y si era de 3mg/l la aireación se encendía. Pero debido a la aireación del flujo y de la concentración de residuo en el agua, el horario de estos cambios no puede ser determinado y a veces es muy impreciso y no supe las necesidades.

Entonces para diseñar el controlador los siguientes aspectos fueron tomados en cuenta:

- Minimizar la cantidad de nitrógeno inorgánico en el agua.
- Remover el amoníaco es predominante sobre la remoción de nitratos debido a sus efectos tóxicos.
- Evitar las condiciones anaeróbicas en el tanque de aireación.

Las entradas del controlador es la rata de la cantidad de amonio y nitratos y la concentración de nitrógeno. La rata de amonio y nitratos son descritas usando una

variable lingüística en términos de alto, bajo y medio. Y la concentración de nitrógeno se describe en términos de bajo y medio.

Ahora bien la primera salida del controlador representa la decisión de proveer oxígeno y la segunda salida representa la decisión de no suministrar oxígeno al tanque, estas dos salidas están expresadas en términos de si o no.

En la gráfica se puede ver claramente la estructura del controlador.

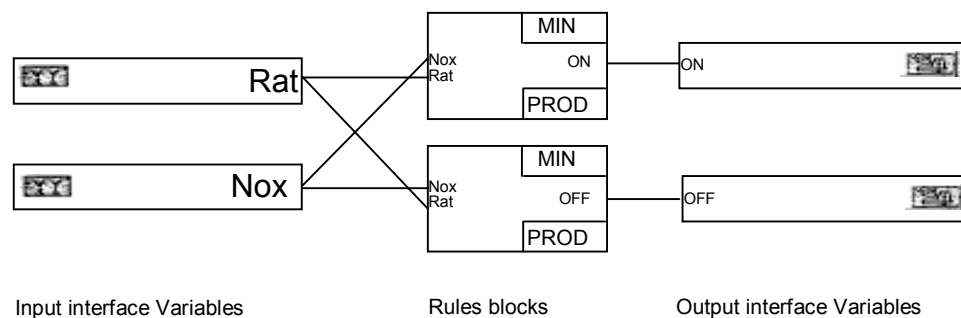


FIGURA 28. Bosquejo del controlador difuso, con las entradas, bloque de reglas, y salidas.

4.3.3.5. CONTROL PD CON FUZZY PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Descripción del proceso

La planta⁵ cuenta con:

- Un recinto con aireación
- Un asentador al final del recipiente con aireación
- Reciclador del agua contaminada. Para este caso los microorganismos son heterótrofos.

Para poder desarrollar el modelo matemático de la planta, se asumieron los siguientes factores:

-La rata específica del crecimiento de los microorganismos es mayor que su rata de mortalidad. Esta rata de crecimiento obedece a la ley Monod, la cual describe que este crecimiento es función solo del substrato y de la concentración de oxígeno, independiente de otras concentraciones de nutrientes, y otros factores ambientales.

- Ninguna reacción bioquímica tiene lugar dentro del tanque de asentamiento
- La biomasa en el tanque de sedimentación es despreciable.
- El flujo de entrada no contiene biomasa ($X_i = 0$).
- Se completa un asentamiento total ($X_e = 0$), pues la contaminación solo se restringe a un flujo de agua contaminada.

⁵ MINIMAL PD FUZZY CONTROL OF A WASTEWATER TREATMENT PLANT. Edgar Sanchez, Jose M Gonzalez, Esperanza Ramirez.

- El reciclaje del agua contaminada afecta el tiempo de contaminación y el coeficiente de producción.

Con estos aspectos claros, los ingenieros deducen un modelo matemático para poder implementar el control PD, el cual va antes del controlador difuso, como se muestra en la figura.

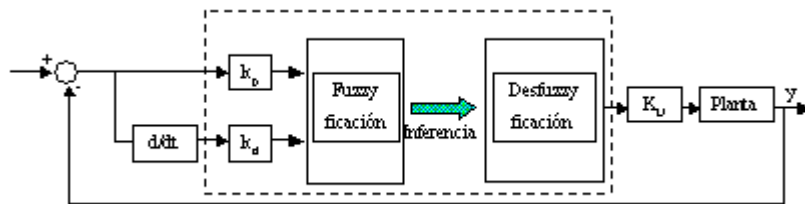


FIGURA 29. Diagrama de bloques del lazo de control de la planta de tratamiento residuales con control PD y Fuzzy.

Ahora bien, la parte del control difuso es la siguiente:

El controlador tiene dos entradas: la señal de error $e(t)$ y su derivada del tiempo.

Tiene una sola salida, $u(t)$ la cual será la señal de control a la planta. Las funciones de membresía de las entradas son lineales

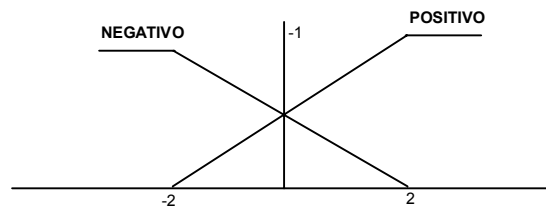


FIGURA 30. Conjunto difuso de las entradas (E y DE) del controlador.

La de la salida es:

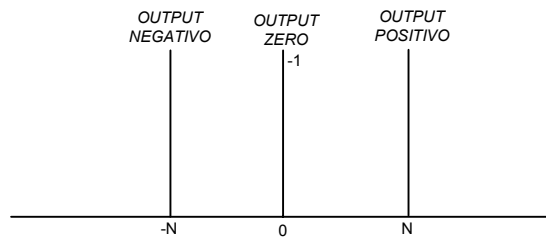


FIGURA 31. Conjunto difuso de la salida del controlador.

A continuación un ejemplo de las reglas usadas en este proceso:

Si e es ep & de es dep ENTONCES u^* es up ,

lo cual quiere decir: La condición ep implica que la salida de planta está por debajo del set point, y dep significa que la derivada del tiempo del error es menor que la del set point, lo cual quiere decir que la acción de control está llevando el sistema hacia abajo. Entonces en este caso, la acción de control debe ser positiva, para hacer que la planta retome su valor de estabilidad.

Para la defuzzificación se usó el método conocido como centroide.

Mediante un controlador sencillo como este se han podido tener resultados satisfactorios en este tipo de plantas.

4.3.3.6. APLICACIÓN DE CONTROL DIFUSO A PROCESO DE DESTILACIÓN QUÍMICA⁶

La destilación es un proceso muy común en todas las plantas químicas, el cual consiste en separar componentes con diferentes temperaturas de un líquido. Por lo general este sistema consta de un termo de destilación, una columna de destilación, un condensador y válvulas que ajustan la rata de flujo y para la recolección de los componentes que han sido separados. El termo de destilación se ubica en un baño térmico con una temperatura ajustable. Y también se cuenta son sensores de presión y temperatura que están conectadas al sistema.

Ahora bien el objetivo es que al separar los componentes estos sean de alta pureza. El control manual se efectúa de la siguiente forma : dependiendo de los gradientes de presión y temperatura en los diferentes puntos dentro del sistema, la temperatura del baño térmico, la presión y la rata de flujo varia dentro de la planta. Adicionalmente se tienen en cuenta aspectos no cuantificables como lo son la forma de las gotas y la forma o vetas que se puedan formar en la columna. La planta para la cual se le ha implementado este tipo de control es la siguiente:

⁶ APPLICATION OF FUZZY CONTROL IN CHEMICAL DISTILLATION PROCESS.Gerhard Klett.

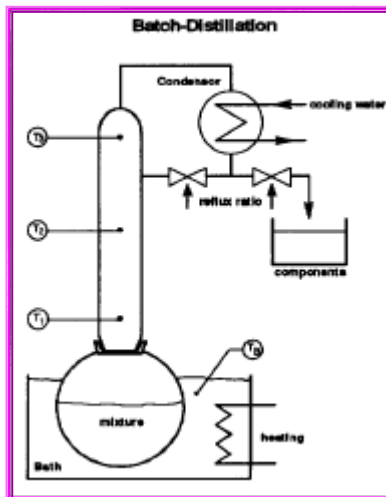


FIGURA 32. Diagrama de la planta de destilación química,

Para el diseño de la estrategia de control hay dos aspectos importantes: los componentes separados deben tener una alta pureza y la presión en el sistema se debe mantener constante. De la física se conoce, que una temperatura constante en la cabeza de la columna equivale a una presión constante durante la separación del componente. Y el incremento de la temperatura es la que identifica la separación del siguiente componente. Partiendo de esos conocimientos se escogieron 8 variables lingüísticas y sus valores para implementar el control difuso: 5 son entradas y 3 son las salidas del controlador.

Las entradas son las siguientes:

Presión diferencial: expresada en términos de bajo, medio, alto y muy alto.

Diferencia de temperatura: expresada en términos bajo, medio y alto

Gradientes de temperatura: expresados en términos bajo, medio y alto

Las salidas son:

- Rata de reflujo: en términos de muy bajo, bajo, alto, muy alto, demasiado alto
- Temperatura del baño térmico: en términos de bajo, medio y alto
- Valor de presión: en términos de bajo, medio y alto

Se usaron funciones de membresías lineales triangulares y se les otorgo valores técnicos a los pesos lineales.

Como resultado de este control se encontró que no existía una diferencia significativa en la pureza de los componentes entre la destilación gobernada por la lógica difusa y aquella ejecutada manualmente, la planta se mantuvo estable en términos de presión mientras que en forma manual, fluctuaba mucho, y se redujo el tiempo que se requiere para la destilación a la mitad. Lo que da como resultado un control multivariable exitoso.

4.3.4. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Entre las aplicaciones de control fuzzy se encuentran, control de climatizado, bloqueo para frenos, control en la transmisión, en la suspensión, y en el concepto de carros inteligentes o aquellos carros que sean capaz de seguir una ruta.

4.3.4.1. CONTROL PARA SITUACIONES EXCEPCIONALES DE DESLIZAMIENTO EN AUTOMÓVILES.

Dentro de las aplicaciones en la industria automotriz, uno de los intereses esta basado en el comportamiento dinámico del carro cuando éste se encuentra en situaciones criticas como cuando un carro de desliza (patina) o pierde el control de si. En tales circunstancias es donde se utiliza un controlador difuso para reestablecer la estabilidad del automóvil. Este concepto abarca más mucho más que dispositivos anti deslizamientos. Para tal tipo de control, no existe un modelo matemático y tampoco puede ser desarrollado en un tiempo razonable.

Para usar este tipo de control se utilizo un carro de prueba el cual ha sido diseñado para que tenga una operación autónoma, el cual funciona con redes neuronales y lógica difusa.

Se usan sensores sobre las direcciones del carro, frontal, izquierdo y derecho. Además se utilizan sensores infrarrojos para tener datos individuales de la velocidad de cada llanta, es decir 4 sensores de este tipo ubicado cada uno en una llanta. Como los sensores ultrasónicos solo miden la distancia relativa a un ángulo desde cierta dirección del carro el controlador debe “deducir” su posición y orientación a partir del dato.

El objetivo del carro es poder conducir tan rápido como sea posible sin chocar con ningún obstáculo a algún borde y además sin llegar a estar en una condición de inestabilidad como las mencionadas anteriormente y de ser así que su estabilidad sea recuperada lo más rápido posible.

Las reglas se hicieron con base en los datos observados a través de los sensores, los cuales hacían parte de las premisas, y las variables de comando (es decir el dato a los actuadores) en sus conclusiones.

La estrategia de control se dividió en dos partes. La primera etapa es la que realiza el diagnostico de la situación del carro y en la segunda es donde la acción de control se lleva a cabo.⁷

4.3.4.2. APLICACIÓN DE CONTROL AUTOMÁTICO DE UN TREN⁸

Se usa la lógica difusa porque permite usar el conocimiento del operador para generar la estrategia de control, este caso es similar al control automático que se utilizó en el de Sendai en Japón.

Es un método que combina el control difuso, un algoritmo, control predictivo y utiliza la simulación por computadora. Este presupone el manejo seguro del tren, la velocidad de este, el confort evaluando a ruta mas corta entre dos estaciones,

⁷ ADVANCED FUZZY LOGIC CONTROL TECHNOLOGIES IN AUTOMOTIVE APPLITACION. C.von Altrock,B. Krause y H-J.Zimmernann.

APPLICATION OF INTELLIGENT CONTROL IN AUTOMOTIVE VEHICLES. RP Jones, AS Cherry y D S Farrel.

⁸ THE RESEARCH OF FUZZY PREDICTING AND ITS APPLICATION IN TRAIN'S AUTOMATIC CONTROL. Feng Xiaoyun, Jia Junbo, Li Zhi.

reduciendo consumo de energía a través de la optimización del sistema. Ver la figura para mayor comprensión.

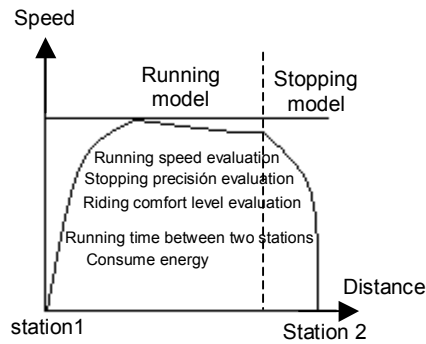


FIGURA 34. Gráfica explicativa de los aspectos a evaluar en el control del tren.

Como primer paso se evalúa el conocimiento básico del operador del tren.

Cuando se habla el estado del tren se refiere a la ubicación de este, su velocidad y estado de operación. En el conocimiento se tiene en cuenta cuando se deben realizar los cambios de estado del tren, dentro de los cuales se incluyen confirmación de operación, frenado, cambios de velocidad, encendido, parada, etc y la prioridad que tiene cada uno de estos cambios. Esto se encuentra en las siguientes tablas:

Current	Priority Order	To charge state
To start	1	To tract
To tract	1	To coast
To coast	1	To tract
	2	Permanent speed
	3	Stop to brake
	4	Slow down to brake
Permanent Speed	1	To coast
	2	Stop to brake
	3	Slow down to brake
Slow down to brake	1	To coast
	2	Permanent speed
	1	Stop to brake
Stop to brake	1	Stop to brake

Tabla 7. Tablas donde se indica el valor de importancia de algunas de las acciones del controlador.

Cuando al tren se le da la señal de encendido, el debe empezar su aceleración y no puede exceder su limite de velocidad, finalmente debe parar en la estación determinada.

Ahora bien el control automático del tren se puede dividir en el control automático del recorrido y el control automático de frenado. Bajo la base del conocimiento de cómo se maneja un tren, se deducen las reglas.

Un ejemplo puede ser:

Si el tren esta lejos de su posición maneje el tren de acuerdo a las reglas de recorrido. Si el tren esta cerca de su posición, baje la velocidad, y actúe de acuerdo al control de frenado.

A continuación se muestra una gráfica del proceso de inferencia del control.

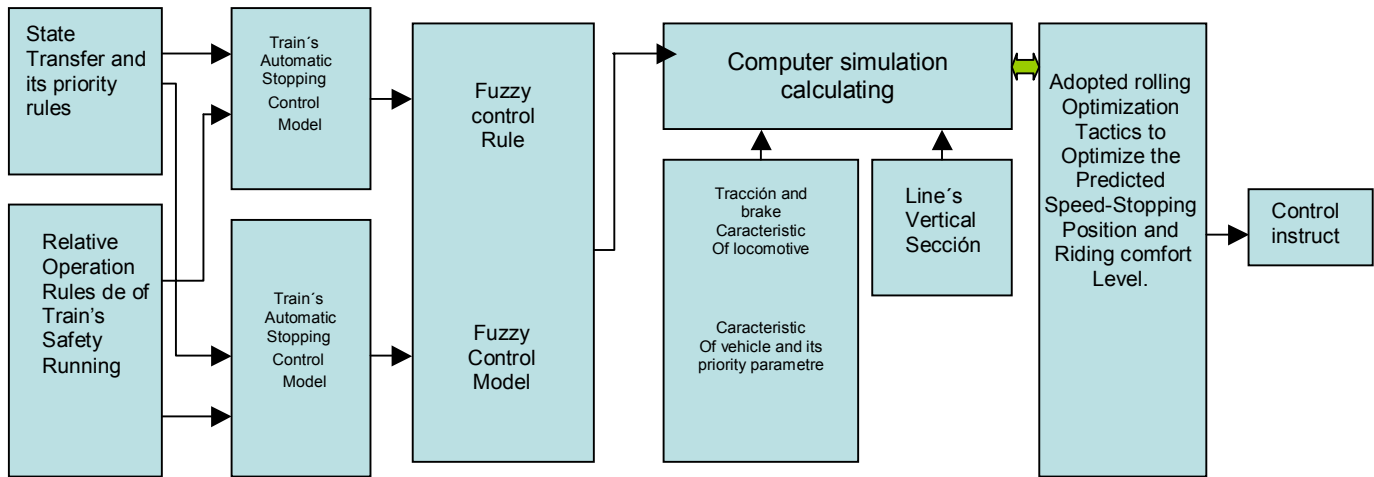


FIGURA 35. Gráfica del proceso de inferencia del control del tren.

4.3.5. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA METALURGICA

En la industria metalúrgica muchos de los procesos son controlados a través del conocimiento humano, y en algunas aplicaciones es muy difícil obtener datos precisos para poder tomar decisiones sobre el proceso.

Como en esta industria se manejan distintos materiales, cuyas características son totalmente diferentes las unas a las otras, y la experiencia humana juega un rol importante para la correcta identificación de éstas. Además muchas de estas plantas no tienen un modelo matemático y menos aun los efectos que generan el cambio de algunos parámetros.

Una aplicación muy usada en la industrial son las maquinas de soldadura eléctrica, las cuales son usadas para el ensamble de todo tipo de piezas metálicas, y es usada en la industria manufacturera, automotriz, entre otros.

4.3.5.1. CONTROL DE UNA MÁQUINA DE SOLDADURA ELÉCTRICA USANDO LÓGICA DIFUSA.

Esta aplicación describe una aplicación de lógica difusa a un control térmico espacial en la soldadura por fusión.

La automatización en los procesos de soldadura, han cobrado mayor importancia debido a la búsqueda de mayor calidad en la soldadura y el bajo costo que esto implica.

La aplicación a la cual se hará referencia es a la soldadura por pulsos de gas mediante arcos metálicos o PGMAW (pulse gas metal arc welding), el cual funde los metales a unir, a través del calor producido por un arco eléctrico, entre un electrodo de metal de aporte y la pieza de trabajo, los cuales están protegidos por una atmósfera inerte suministrada externamente, y es usada en las fabricaciones de bicicletas, automóviles y cualquier pieza metálica.⁹

⁹ APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO SPATIAL THERMAL CONTROL IN FUSION WELDING. Zafer Bingul, George E. Cook, Fellow, IEEE y Alvin M. Strauss.

Los componentes para este tipo de sistemas, son una maquina para soldar de voltaje constante, alimentador de alambre sólido, pistola, gases y mezclas para soldar, y alambre sólido como soldadura

Este, es uno de los métodos para soldar mas utilizados, principalmente por que es apto para cualquier aplicación y porque se puede automatizar. Los problemas que se pueden enumerar en la automatización de la soldadura a través de arcos eléctricos incluyen medición, seguimiento de las juntas, y la falta de modelos matemáticos adecuados para predicción de parámetros y control de calidad. El problema con los parámetros y con el control de calidad ocurre frecuentemente en el proceso de soldadura PGAWM por el gran número de parámetros que interactúan los cuales deben ser fijados y controlados con precisión. Mas aun, el controlar este proceso con las técnicas de control tradicional es casi imposible debido a lo complicado de la dinámica del sistema, presenta no linealidades muy altas y variaciones del proceso con el tiempo. Por esto, se ha decide utilizar el control con lógica difusa el cual provee métodos muy aproximados en términos de la descripción del comportamiento del sistema.

Un campo importante de aplicación donde la lógica difusa ha jugado un rol importante es en el control de electrodos consumibles en procesos de soldadura con arcos metálicos. Para los procesos con electrodos consumibles, se presentan tres tipos de transferencia natural los cuales son: corto circuito, globular y transferencia por spray. El modo de operación de alta corriente es un método de

transferencia por spray en donde discretas gotas de metal son sacadas del alambre bajo las fuertes fuerzas del arco y a través de él. A niveles bajos de corriente el metal se transfiere por corto circuito (bajo voltaje) donde el electrodo se derrite en la medida en que haga contacto con la superficie, y el método de transferencia globular (son voltajes muy altos para corto circuitos), el cual se caracteriza por grandes gotas que se sueltan del electrodo y que son de un diámetro considerable. En el método de corto circuito, la transferencia solo ocurre durante el periodo del corto y su estabilidad se puede determinar por el estado de la fuente, el gas, y el material que se está soldando. En todos los modos de operación, la estabilidad de la transferencia del metal también es influenciado por el comportamiento del electrodo que se está fundiendo y la tensión de la superficie y las propiedades de viscosidad de la gota derretida. Un aspecto común de las inestabilidades de los arcos en estos procesos ha sido la inhabilidad de identificar la causa de la pérdida de control en la transferencia del metal o de predecir con algún grado de certeza las composiciones del material las cuales resultaran en un pobre comportamiento en la transferencia arco/eléctrica.

Una importante variación de los tres modelos básicos de transferencia de metal se realiza en el PGMAW proceso en cual gotas individuales son inducidas para transferirse a través de pulsos regulares de la corriente entre un fondo de nivel muy bajo para producir transferencia por spray a un nivel pico. La súper imposición de la corriente del pulso sobre la corriente del entorno produce un arco

estático que produce una transferencia por spray sin la necesidad de altos niveles de corriente como los necesarios en la técnica convencional.

Bajo este contexto, se ven ante la tarea de desarrollar sistemas de control para sistemas no lineales y variantes en el tiempo como los electrodos consumibles en procesos con arcos eléctricos, los cuales se pueden conseguir con controladores difusos.

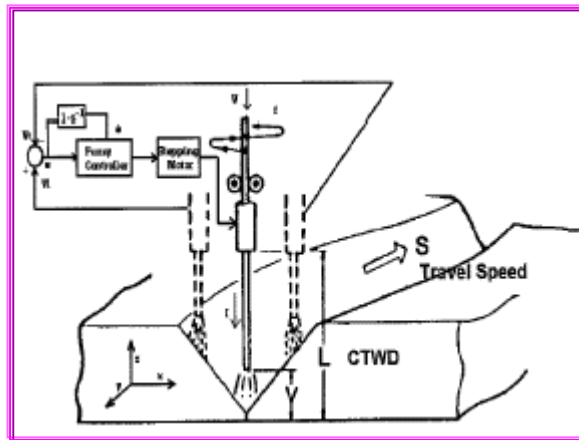


FIGURA 36. Sistema de control para la maquina de soldar

Implementación de la lógica difusa

El voltaje del arco eléctrico es una cantidad física e influencia el proceso de diferentes formas, como por ejemplo la transferencia del metal, características penetración y estabilidad del arco. Estas propiedades tienen diferentes dependencias con el voltaje del arco, de forma que los cambios de voltaje introducen un factor estadístico en el proceso e influyen la salida de este como por ejemplo en la geometría, micro estructura, y propiedades mecánicas de la pieza final que haya sido soldada. Entender la relación entre el tubo que hace

contacto y el arco es esencial para poder llevar a cabo el control. En general es una tarea difícil por los problemas de ruido y perturbaciones internas asociadas al ambiente donde se hacen soldaduras (incluyen altas temperaturas, ruido electromagnético, salpicadas, humo). El objetivo es desarrollar una técnica de control para el seguimiento del arco en PGMAW. En este trabajo, la señal del voltaje promedio se utiliza como la señal de control del controlador fuzzy. La señal de voltaje promedio procesado se usa para fuzzificar las entradas. La figura 1 muestra un diagrama del sistema. El voltaje que es sensado es la entrada del proceso y el motor que sigue la línea del centro es la salida del proceso para controlar la trayectoria de la junta soldada. El soplete normalmente oscila hacia atrás y a través de la línea del centro de la junta. La posición del soplete con respecto a la junta soldada se puede determinar a través de la medición de cambio en el voltaje del arco correspondiente con su longitud. La diferencia entre los dos voltajes correspondientes a los lados derecho e izquierdo indica la posición de error. El controlador lógico puede ser manejado usando este error.

Control de la trayectoria de la junta

Para producir soldaduras con una geometría específica y obtener buena calidad y resultados, es necesario detectar y controlar la actitud y la posición del soplete. El método de sensado y control basado solamente en arco como sensor se conoce como “seguimiento a través del arco”. En otras palabras, las propiedades físicas del arco para soldar se utilizan para proveer información sobre la posición de la

superficie del arco en tiempo real. Este método de sensado y otros han sido usado extensivamente en robótica y otras aplicaciones automáticas de soldadura porque tiene la ventaja de que no se necesita ningún sensor alrededor del soplete. Con este método, a medida que el soplete, oscila hacia atrás y hacia delante cruzando la juntura, cambia la geometría de la juntura y esto se refleja en cambios en el arco eléctrico. De esta forma, es posible medir la geometría de la juntura con relación al camino del electrodo. Cuando el la distancia entre el tubo de contacto y el espacio de trabajo se reduce, la voltaje promedio de soldar también se reduce. Y así como la altura del soplete a partir desde la base metálica se incrementa, el voltaje para soldar también. Cuando la posición del soplete esta en los extremos derecho e izquierdo, los valores de voltaje son mínimos, y el voltaje en el centro es el mayor. Basados en estas características, la juntura soldada, puede ser modelada y se pueden desarrollar algoritmos de control para hacer correcciones en la posición del electrodo.

Para controlar la posición del electrodo se uso un algoritmo que se basa en los valores promedios de voltaje a cada extremo de la oscilación. Estos dos valores de voltajes, medidos por un ciclo lateral de oscilación, son utilizados para controlar la posición del electrodo con relación a la juntura para propósitos de centralizarlo. El valor promedio en el extremo izquierda de la oscilación fue comparada con el voltaje promedio a la lado derecho de la oscilación, y la diferencia entre estas dos señales fue usada para determinar las dirección para que se pueda seguir la veta. Si la diferencia es positiva, el soplete debe ser movido hacia la izquierda y si es

negativa la dirección del movimiento lateral debe ser retrocedida. La señal de la diferencia es utilizada para manejar un servo en la dirección correcta para reducir la diferencia de la señal a 0 lo que quiere decir que el electrodo este centrado. La cantidad de corrección lateral depende de la diferencia de la señal y de las reglas de los conjuntos fuzzy. Bajo condiciones donde las mediciones de voltaje a los lados presentan ruidos, el controlador difuso se comporta como un filtro que suaviza la señal de voltaje.

Diseño del controlador difuso (FLC)

La entrada del FLC es el voltaje error promedio. Procesar la señal de voltaje promedio y mover el soplete para correcciones toma tiempo. Esto da como resultado un retraso en el tiempo el cual puede ser acomodado usando la señal de la derivada del error. Así que la desviación del error se adopto como otra entrada al FLC. Cinco tipos de membresía (ZO, cero, S small, M mediano, L largo, VL muy largo) y funciones de membresías triangulares se usaron para fuzzificar las entradas.

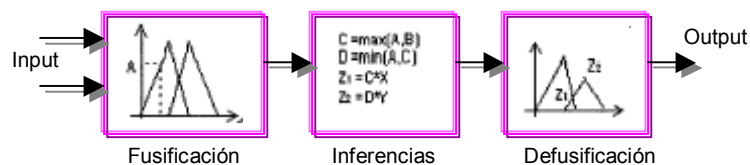


FIGURA 38. Resumen de la operación del sistema difuso.

Cuando el error de la línea central $e = V_{\text{derecho}} - V_{\text{izquierdo}}$ es positiva, entonces la línea del centro debe ser movida a la izquierda y el movimiento se debe incrementar.

Para evaluar un valor de entrada a servo motor, la inferencia fuzzy debe proveer una conclusión de las reglas. Para cada entrada dada, debe haber una membresía y la salida será la posición del motor y la cantidad de voltaje del arco.

4.3.5.2. APLICACIÓN INDUSTRIAL DE COMPARACIÓN DE IMÁGENES EN EL CONTROL DE CALIDAD.

Para imágenes representadas como conjuntos borrosos una relación especial con fuzzy (llamada analogía) es usada para comparar imágenes. Los conjuntos borrosos representando imágenes se definen con base en características elementales de la imagen.

El reconocimiento óptico industrial es un campo de aplicación en donde un análisis estructural de la imagen es importante, debido a que las formas, contornos, identifican al objeto.

El análisis de imágenes ha sido aplicado en muchas aplicaciones industriales. Por ejemplo el análisis de la calidad de ciertas piezas, la calidad de ubicación de piezas, el buen estado de un producto entre otros.

En ejemplo puede ser el análisis de superficies metálicas o plásticas, por ejemplo: La clasificación de las superficies plásticas es necesaria para revisar los niveles de dispersión. Diferentes calidades del proceso de dispersión pueden ser observadas usando un microscopio. Una alta calidad en la dispersión lleva a tener superficies suaves mientras que una baja calidad se le otorga a una superficie rugosa. De esta forma se aplica un seguimiento a la calidad del material.

4.3.6. APLICACIONES A CONTROL DE SUB ESTACIONES ELECTRICAS

Las subestaciones eléctricas son aquellas encargadas de la transformación de voltaje para poder proveer energía segura y efectiva a los consumidos. Este abastecimiento de energía tiene que ser realizado con suficiente calidad y debe garantizar la seguridad de los equipos que estén involucrados en el sistema.

La automatización de las subestaciones eléctricas es un área que esta bajo constante desarrollo, pues el control de una subestación es un tarea compleja en donde las decisiones tomadas sobre las variables influyen en el comportamiento de la subestación. Bajo estas circunstancias, el uso de un control relacionado con inteligencia artificial puede ser muy útil¹⁰.

Estas aplicaciones están divididas según el área:

¹⁰ AI AUTOMATES SUBSTATION CENTRAL. Melvin Ayala S, Galdenoro Botura Jr, Oscar A Maldonado A.

Área de Control: los problemas mas comunes son los estabilizadores del sistema, control de maquinas, control de frecuencia.

Área de Optimización: Planeacion, Horario de Generación, optimización del sistema de distribución.

Área de Operación: análisis de contingencia, control de voltaje/VAR, decisión, flujo de potencia.

Área de protección y diagnostico: protección de la línea de transmisión, localización de la falla, diagnostico de falla en transformadores, monitoreo de la condición de la planta.

Dentro de los aspectos más importantes relacionadas con este tipo de control se pueden mencionar:

- Selección de las magnitudes a ser controladas.
- Definición e implementación de las técnicas de inteligencia artificial que se van a utilizar.
- Elaboración de una herramienta de programación para que ejecute las operaciones de control.

- Selección, adquisición e instalación de equipos de medición y de control interfases con el equipo.
- Aplicación de la técnica de control a las subestaciones existentes.

El objetivo es que se controlen los estados de los breakers de circuitos (circuit breakers, CB) de una subestación haciendo uso de los conocimientos básicos de algunas magnitudes de operación, combinando de variables de estado con variables de tiempo y conjuntos difusos.

Aun cuando todas las magnitudes a controlar no pueden ser incluidas en el análisis (en parte debido a la gran cantidad de mediciones y variables de estado de las subestaciones y a la gran cantidad de reglas que estas requerirían), es posible controlar el estado deseado mientras se supervisan algunas magnitudes importantes tales como el voltaje, factor de potencia, distorsión por armónicos, así como también el estado presente.

A continuación se explica el caso de una planta en específico sobre la cual se realizó un estudio.

Descripción de la planta

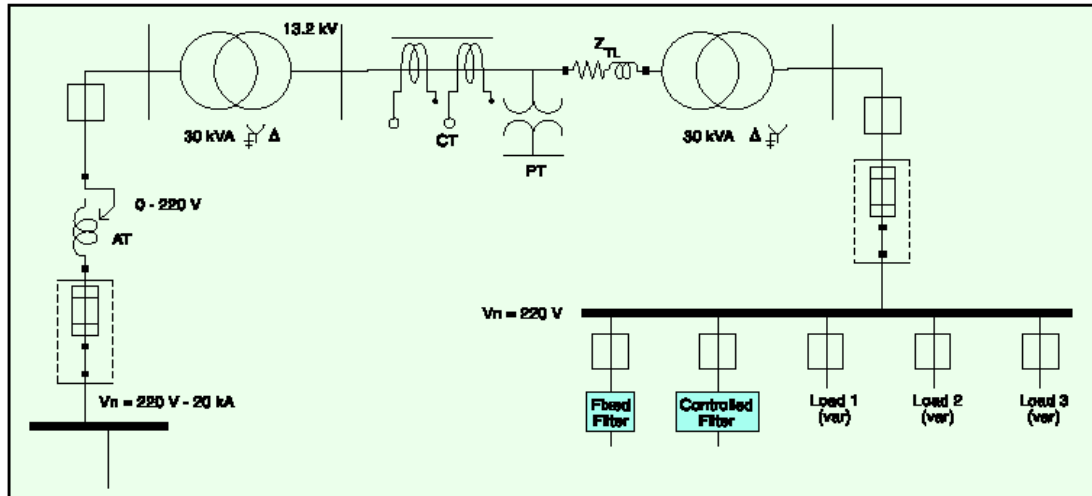


FIGURA39. Diagrama de la subestación eléctrica.

El sistema representa una estación con dos transformadores trifásicos de 30kVA, dos CB, dos interruptores, tres transformadores, y dos transformadores de corriente y dos transformadores de potencial. También contiene un auto transformador (para regular el voltaje de entrada) así como también una impedancia para simular la existencia de una línea de transmisión. El voltaje de entrada y el voltaje de salida es el mismo 220V. Esta característica se selecciono así para poder analizar la operación del controlador en una escala de laboratorio.

El primer transformador, incrementa el voltaje a un valor de 13.2 kV, mientras que el segundo lo reduce otra vez a 220. Un filtro, un filtro automático para el control del factor de potencia y la regulación de voltaje, y tres líneas de alimentación con

diferente tipo de cargas de diferente naturaleza (incluyendo aquellas que no son lineales) están conectadas a través de CB a la salida.

Como los elementos de control en las subestaciones con los CB y los interruptores la meta es permitir el control de 5 CB que han sido seleccionados de la salida, de acuerdo a ciertas configuraciones y mediciones de variables observadas. Inicialmente el computador tratara de controlar la planta y enviara señales de alarma cuando no pueda encontrar la solución, y quedara en espera de intervención humana. De esta forma aprenderá como reacciona un operador humano ante las entradas y será capaz de generar las reglas correspondientes a ese comportamiento. De esta forma, el sistema ira reemplazando gradualmente al operador.

Diseño del controlador

Las variables escogidas para este caso fueron:

Variables de entrada:

Vout: Voltaje en el bus de salida, en una fase (V)

PF: factor de potencia en el bus de salida, en una fase

THDv (%): distorsión armónica del voltaje en total (%)

Tv, t (s): Periodo de tiempo durante el cual el voltaje se mantiene en el rango [114.3-119.5] (zona de tolerancia)

Tv, nt (s): Periodo del tiempo durante el cual voltaje esta por debajo de 114.2 (zona de alerta)

En la selección de las variables se tuvieron en cuenta muchos aspectos. Por ejemplo, las influencias del voltaje en la conexión y desconexión de cargas cuando su valor deja de estar en ciertos rangos durante un periodo de tiempo.

El decremento del voltaje en 7.5% debajo del valor nominal es permitido durante cierto tiempo (por ejemplo, 10 min), mientras que un 10 % sobre el valor nominal solo es permitido durante 20s. En este caso de que estos límites sean excedidos, las cargas serán desconectadas en un orden preferencial establecido. La reconexión de las cargas ocurrirá cuando el voltaje llegue a estar dentro de la zona de tolerancia.

Por otro lado, el factor de potencia y la distorsión de voltaje debido a los armónicos, influye en la conexión y desconexión de filtros y capacitores. Estas variables pueden ser leídas a través de sensores y/o transductores que incluyan un acondicionamiento a la señal y dirigidas a una tarjeta de adquisición de datos (DAC) a través de líneas análogas. En este ejemplo, el amperaje y el voltaje en cada fase no se tienen en cuenta, debido al gran número de reglas que podría requerir el controlador.

Los CB fueron definidos como variables de estado. Los interruptores no fueron incluidos tampoco, por que su estado es solo importante para conmutación y no para propósitos de control.

Las variables de estado definidas son las siguientes:

Df: Estado del CB conectado a el filtro ***fixed***

Dc: Estado del CB conectado al filtro controlado

D11, D12, D13: Estado de los CB conectado a los alimentadores de las cargas 1,2, y 3.

Cada combinación de las variables de estado define una topología y es una entrada al controlador. Valores positivos para cada variable de estado son 0 (abierto) y 1 (cerrado).

Entonces, lo que se intenta es controlar el momento en el cual los filtros y las cargas deben ser conectados y desconectados a través de señales que son mandadas al CB. El filtro controlado, una vez es conectado, mantendrá su función como un filtro automático dependiendo de la distorsión del armónico que este presente en ese momento. En caso de que un filtro se desconecte debido a sobre corriente, el controlador puede activar las reglas de conexión después de cierto tiempo el cual debe ser definido antes de que el controlador comience.

Las acciones necesarias como respuesta a perturbaciones en las mediciones (valores fuera de los rangos normales) son dependientes no solo de las características de estas, sino también de la topología que tenga la subestación. Por ejemplo, la conexión del filtro controlado solo puede ocurrir cuando el filtro fixed este conectado. Similarmente, la desconexión del fixed filtro solo puede ocurrir después de que el filtro controlado haya sido desconectado.

Las variables de estado se consideran como variables de entrada y de salida. Cada CB mantendrá su función de protección Standard contra sobrecorriente. Como las señales a estos dispositivos son enviadas a través de relés adicionales para activar los CBS, pueden ser rearmados para que tengan la habilidad de ser controlador en paralelo.

Las variables de estado son leídas por sensores y/o transductores y conectados a líneas digitales al DAC. Las salidas también son enviadas a través de líneas digitales a los relés de CB.

Para la definición de los conjuntos, las funciones triangular y trapezoidal fueron utilizadas.

Las variables de estado no fueron fuzzificadas por que sus mediciones no proveen incertidumbres. Solo aceptan dos valores: 0 y 1.

El tiempo durante el cual el voltaje esta en un rango tolerable o no tolerable es supervisado a través de contadores.

Sistema de Reglas

La sintaxis de cada regla, se puede expresar a través del ejemplo:

**SI (V es tolerable) & (PF Bajo) & (THD es tolerable) & (Tv, t es aceptable) &
(Tv, nt es cero) & (Topología actual es 00110)**

ENTONCES

(La topología deseada es 10110)

La topología es expresa como un número de 5 dígitos binarios, los cuales hacen referencia a los cinco CB en el siguiente orden:

- Primer digito: CB del filtro ***fixed***
- Segundo Digito: CB del filtro controlador
- Tercer Digito: CB de la primera carga (por prioridad es la numero 1)
- Cuarto Digito: CB de la segunda carga (prioridad 2)
- Quinto Digito: CB de la tercera carga (prioridad 3)

La regla expresada anteriormente quiere decir:

Si la topología presente es 00110 (en este caso, los dos filtros están desconectados y solo están conectadas las cargas 1 y 2) y la situación actual es la siguiente:

- Voltaje tolerable.
- Factor de potencia bajo.
- distorsión por armónicos tolerable.
- El voltaje ha permanecido en la zona de tolerabilidad por un tiempo aceptable.
- Voltaje no ha entrado aun a la zona de no tolerabilidad.

Entonces la topología que se desea es la 10110, la cual significa que se debe conmutar el ***fixed filter***.

Para establecer la conexión y desconexión de las cargas, se le atribuyo la carga uno la mayor prioridad y a la tres la menor.

La definición de las variables análogas se hizo en los siguientes términos:

1. Para V_{out} , los conjuntos borrosos son NT (no tolerable), T(tolerable),N (normal).
2. Para PF, los conjuntos borrosos son NT, T, H (height).
3. Para THDv, los conjuntos borrosos son L (low) T, H.
4. Para T_v , t los conjuntos son Z (cero) A (acceptable) NA (no acceptable).
5. Para T_v ,nt Z(cero),A(acceptable),NA(no acceptable)

Modo de operación del controlador

El controlador puede ser operado de dos formas. La primera es siguiendo la forma típica de como lo operan, la cual es con el juego de reglas completo, reemplazando totalmente al operador. O bien puede ser iniciado, vacío o con pocas reglas, lo cual quiere decir que es mecanismo activo de aprendizaje, lo cual ya incluirá una red neuronal artificial. De esta forma, el controlador completará paso por paso las reglas de operación y al mismo tiempo irá reemplazando al operador.

Para la desconexión de las cargas cuando el voltaje disminuya, los siguientes pasos pueden ser procesados como una respuesta automática de algunos dispositivos:

- Cambio automático del **tab** en los transformadores.
- regulación de voltaje en el auto transformador

Si todas estas posibilidades se han tratado y el voltaje continúa bajo, entonces las salidas del operador son procesadas.

Para evitar interferencias con su respuesta, la ejecución de las salidas del controlador (ejemplo. cambio de estados en los CB) puede ser postergada cada

vez para un intervalo de prueba, y en el siguiente intervalo se harán los cambios de estado.

En caso de que el sistema no pueda encontrar una solución satisfactoria porque ninguna regla cumple, el sistema manda una alarma al operador. El tendrá tiempo para decidir que acción tomar usando los interruptores que aparecen en el monitor del PC.

Si la acción del operador no llega durante el periodo de tiempo establecido (debido a retrasos o a la ausencia del operador), entonces el controlador ejecutara una regla de protección previamente definida, la cual puede ser, por ejemplo, la desconexión completa de la subestación. Después de la saturación de la base de aprendizaje, después de cierto tiempo de operación, el sistema generara y entrenara una red neuronal artificial para poder reemplazar la base de reglas.

Sin embargo el control difuso es una muy buena opción para controlar esta subestación y tiene la ventaja de que puede acelerar el tiempo de respuesta y disminuir la posibilidad de riesgos que están relacionados con operaciones humanas.

4.3.7. APLICACIONES HIDRÁULICAS

4.3.7.1. ESTRATEGIA DE CONTROL PARA UNA VÁLVULA HIDRÁULICA DE ACEITE.

Por razón de simplicidad y economía muchos equipos de operaciones en el campo de los sectores de lubricantes, aceites, petróleo, son equipados con válvulas hidráulicas de tres estados¹¹, como dispositivo de control primario en vez de usar sistemas mas sofisticados y de precisión como los servo sistemas hidráulicos. Estas válvulas tienen tres estados de operación, cerrada, abierta y sin movimiento. A menudo este tipo de válvulas hidráulicas son usadas para obtener alto control con precisión, en aspectos como el control de la rata de flujo, control de densidad, etc. Este tipo de control combina la teoría de control difuso y la tecnología de estas válvulas de tres estados.

En la industria es muy usual usar válvulas hidráulicas de tres estados como un dispositivo de control para poder tener gran precisión. Normalmente, esta válvula es conectada a una puerta de control de cierto flujo tal como agua, líquido, cemento, etc. Solo hay tres estados de operación para estas válvulas, cerrada, abierta y sin movimiento y su operación no es continua. Una compuerta es un dispositivo continuo y el abrirla tiene una relación directa con la salida del proceso que esta siendo controlado. El uso de una válvula discontinua con operaciones

¹¹ A NEW CONTROL STRATEGY FOR HIDRAULIC VALVE APPLICATION IN OIL FIELD. Yuming Zen.

limitadas para controlar una puerta continua con alto grado de precisión no es fácil.

La idea es mostrar el control de la abertura de la compuerta a través de una válvula de tres estados. Este tipo de control combina la lógica difusa y el control que proporciona esta válvula, el cual forma un controlador discontinuo que tiene las siguientes características:

1. Es un controlador basado en lógica difusa, lo cual quiere decir que sus entradas están expresadas lingüísticamente.
2. La salida del controlador también es una variable fuzzy.

Esto no quiere decir que se elimina el elemento defuzzificador, el cual es necesario, pero hace que la salida del controlador pueda ser una interfase con la válvula de tres estados.

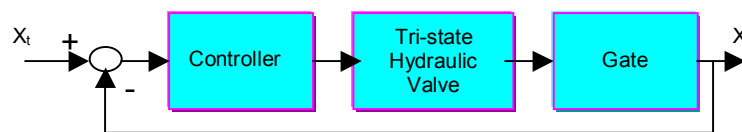


FIGURA 40. Sistema de control para abertura de compuerta y válvula hidráulica.

3. Las entradas y salidas del control son variables difusas, lo cual quiere decir que la estrategia de control puede ser aplicada a varias formas de válvulas de tres estados y procesos controlados.

4. El proceso de fuzzificaciones del controlador y la relación entrada-salida están representadas cuantitativamente por tres parámetros.
5. Para el control de la válvula se usa un controlador discontinua pues solo puede tener tres salidas, cerrada, abierta o sin movimiento.
6. La entrada de la válvula es una variable fuzzy la cual puede ser expresada en etiquetas lingüísticas como: abierta, sin movimiento, cerrada.

Lo cual quiere decir que la lógica de control difusa será la forma de elección de la estrategia de control.

Diseño de la estrategia de control

El controlador que se propone es basado en lógica difusa. De acuerdo a eso los controladores tiene la estructura de la figura

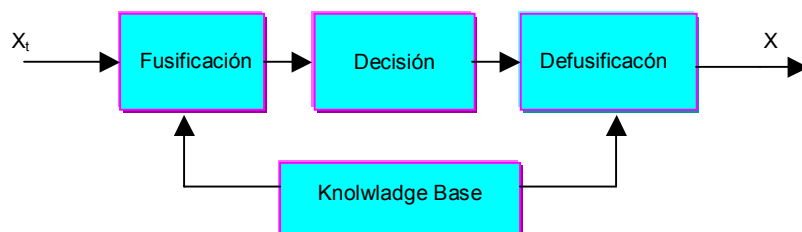


FIGURA 41. Estructura del controlador difuso.

Donde $e = r - y$, y es la salida de la planta que se va a controlar, r es el set point, e' es la derivada de e y u es la salida del controlador.

En el controlador difuso, el error e y su derivada e' se expresan en términos lingüísticos. Este proceso se llama fuzzificación.

La base de conocimiento se compone de un conjunto de reglas de la forma

Si e es Lve & e' es Lve' entonces fuerza es LVF

Donde Lve, Lve' y LVF son valores lingüísticos así como pequeño mediando grande.

El error y su derivada se fuzzificaron en estos conjuntos

$e = PB, PM, S, NM, NB$

$e' = P, Z, N$

Donde PB es positivo grande

PM positivo medio

S pequeño

NM medio negativo

NB gran negativo

P positivo

Zcero

N negativo

Generación de la salida discontinua

El bloque defuzzificador es necesario para generar la salida continua. Pero como ya se dijo no se necesita una salida continua, y la defuzzificación no es necesaria.

La señal de salida se definió como sigue

Open, P Open, None, Pclosed, Closed

Donde OPEN y CLOSED son variables lingüísticas para manejar la válvula constantemente en las direcciones de abierto o cerrada respectivamente. P OPEN y P CLOSES son variables lingüísticas que significan pulso abierto y pulso cerrado. Son diseñados para abrir o cerrar la válvula en un determinado periodo de pulso. NONE significa que la válvula no esta ni abierta ni cerrada.

Inferencia

La relación entre las entradas y las salidas esta dada por la siguiente tabla

DE \ E	PB	PM	S	NM	NB
P	Closed	Closed	None	None	Open
Z	Closed	None	None	None	Open
N	Closed	None	None	Open	Open

Tabla 9. Tabla De reglas para el control de la válvula de hidráulica.

Implementación de la estrategia de control

Ya teniendo el conjunto de reglas y la forma de relacionar la entrada con la salida , se pueden definir los valores cuantitativos de las variables :

Definición 1:

$e =$ es PB si $e > \text{setpoint} + Z$

es NO, si $e < \text{setpoint} - Z$

Esta constante K esta predeterminada.

Definición 2:

$e =$ PM si $e > \text{set point} + c$

NM, si $e < \text{set point} - c$

Donde $c = k \times Z$; k no puede ser mayor que 1

Definición 3:

$e =$ S si e esta dentro del rango (set point -c, set point +c)

Definición 4:

$e' =$ P positivo si $e' > 0$

N negativo si $e' < 0$

Z cero si $e' = 0$

Definición 5:

La salida del controlador u se dijo era abierta o cerrada, si es una señal con un nivel constante la cual será constantemente energizada por una solenoide o por la válvula de tres estados.

Definición 6:

La salida del controlador se dice P OPEN o PCLOSED si la señal es un pulso y solo energiza la solenoide o la válvula en un periodo de tiempo con un ancho de pulso W_p , donde $W_p = N \times T$.

Donde N es una constante y T es el periodo de muestro del controlador

Proceso para optimización

La sintonización no lineal es la siguiente:

1. Establecer los parámetros constante, k y N .

2. Para cada combinación de constante, k y N varíe el set point y calcule su tiempo de respuesta.
3. Repita el procedimiento anterior hasta que comportamiento sea satisfactorio, y pueda determinar los mejores valores para constante, k y N .

Esta estrategia de control se ha implementado en diferentes empresas como *Canadian Fracmaster Ltd.* Todos los resultados muestran que la estrategia es exitosa y practica.

A continuación se muestran ejemplos donde se utilizan estas válvulas:

Control de una válvula de succión en un sistema de mezclado:

En un sistema de mezclado, a una válvula hidráulica de tres estados se conecta a un cilindro hidráulico. El cilindro maneja una válvula mariposa, La posición de la válvula (0-100%) es la que determina la rata de flujo que entra al mezclador. Este sistema en especial tiene un controlador con $Z = 8.2\%$ $K = 8\%$ $N = 6$ y $T = 30$ ms. La posición de la válvula ante una entrada escalón incremento de un (20 a 80%)

Control de una compuerta en un sistema de cementera

En el sistema de cementera, una válvula de tres estados hidráulica es usada para controlar una compuerta. El cemento seco fluye a través de la compuerta y después es mezclado con agua. A través del control de la apertura de la compuerta, el cemento con la densidad deseada se produce y descarga al aceite.

En esta aplicación el sobre impulso se redujo a 0.2 el tiempo de establecimiento es 10.5s y las constantes son $Z = 1\%$ $k = 11\%$ $N = 4$

5. CONCLUSIONES

En algunas de las aplicaciones, la clave del éxito se basa en la combinación tanto del control convencional y el control difuso como en la experiencia que se tenga con el proceso a automatizar. Lo anterior permite que se implemente un control a una planta sin necesidad de tener el modelo matemático de esta.

Como ventaja se puede enunciar a flexibilidad de este tipo de controladores pues el control se puede ir mejorando paso a paso o a medida que se posea un mayor conocimiento sobre el comportamiento de la planta, pues al conocer tendencias y situaciones extraordinarias, se pueden implementar nuevas reglas que tengan en cuenta estos sucesos. Esta flexibilidad también los hace ideales para ser aplicados en casi cualquier proceso.

Esta técnica de control no reemplaza o descarta las técnicas convencionales de control, al contrario las complementa como una estrategia para implementar control multivariable, como se ha visto en algunas de las aplicaciones expuestas donde la lógica difusa se complementa con controladores convencionales como el PID como con otras técnicas de control avanzado como lo son las redes neuronales o lo que se llama **neuro fuzzy control**. Ahora bien el mayor potencial, se basa en la implementación de control supervisorio a varios lazos de control.

Partiendo del análisis a distintas aplicaciones, se pueden encontrar ideas comunes.

Uno de los atributos más interesantes es que el control difuso brinda la posibilidad de aplicarle información cualitativa y lingüística al sistema, lo cual no se usa en la forma tradicional del diseño de control. Esto ayuda entonces a que el diseño parta siempre de la experiencia humana que se tenga sobre el sistema que se quiere controlar. Con esta técnica también se pueden tener en cuenta situaciones extraordinarias o excepcionales, lo cual brinda una mayor capacidad de control.

También tiene una capacidad de amortiguamiento continuo, lo cual elimina sobre impulsos, eso se deriva del uso no lineal de la velocidad o de la energía que puedan tener otras variables en el control.

Por otro lado es muy ventajoso cuando se tienen grandes restricciones que al pasar sus límites pueden traer graves consecuencias, como en el caso de las plantas de tratamiento de aguas residuales donde violar la ley puede traer consigo una penalización.

En resumen los beneficios de esta técnica son: **captura del conocimiento del operador**, como se aprecia en los casos de control de vehículos, un operador muy hábil es necesario para poder realizar un control muy efectivo. Si estos operadores son capaces de articular su experiencia, la lógica difusa es un método

muy conveniente, pues se puede capturar toda esa información y los beneficios han sido demostrados, como por ejemplo en el control de frenado del metro de Sendai, y en otros sistemas de la actualidad; **manejo de excepciones**, que se refiere a cuando la planta requiere un cambio en su política de control debido a una situación inesperada que se presente; **amortiguamiento general** que se requiere una respuesta rápida del sistema cuando el error es muy grande con respecto al set point.

5. GLOSARIO

Activación: ver grado de activación. La activación de una regla es la deducción de la salida.

Base de Conocimiento: Conjunto de funciones de membresía y reglas de un sistema difuso que contienen la experiencia, el conocimiento del operador o experto, etc.

Base de reglas: Un conjunto de fórmulas lógicas que describen las relaciones o las funciones del mundo real, tales como se usan en muchos programas de inteligencia artificial como, por ejemplo, los de sistemas expertos para ejecutar inferencias. Cada regla de la base de reglas es una proposición lógica, aunque puede adoptar la forma exigida por uno cualquiera de los diversos formatos en uso. Se afirma que un sistema experto es un programa que contiene un motor de inferencia generalizado y una base de reglas particularizada. En esa nomenclatura, base de reglas y base de conocimiento son sinónimos.

Conclusión: Una regla de conclusión es una declaración que combina una variable lingüística y un término lingüístico, va escrita después del término ENTONCES de la regla. Una conclusión puede consistir en una combinación de varias declaraciones.

Conjunto crisp: conjunto de la lógica clásica donde sus miembros pertenecen o no pertenecen en un 100 %.

Conjunto difuso: En la teoría clásica de conjuntos, la función característica define el conjunto, esta función solo toma dos valores discretos 0 (el elemento no pertenece...) o 1(... pertenece al conjunto). Un conjunto difuso esta definido por una función de membresía la cual puede tomar cualquier valor real entre 0 y 1.

Convergencia de dato: consiste en extraer de varios datos uno o mas items de información los cuales puedan ser de diferentes formas. Por ejemplo : de las variables R, V y B las cuales dan el color de un postre, el estado de cocción del postre puede ser deducido. El termino Sensor convergente también es usado.

Defuzzificación: Conversión, después de la inferencia de un conjunto difuso de una variable lingüística de salida a un valor numérico.

Difuso (BORROSO): Técnicas de razonamiento que aplican valores múltiples de verdad o confianza a las restricciones durante la resolución de problemas. Las técnicas difusas pueden ser usadas en algoritmos computacionales que imitan al conocimiento humano para superar la fragilidad de programas que solamente se dirigen a dos posibles valores, verdadero y falso, en el momento de juzgar

opciones. Con este recurso los programas de inteligencia artificial pueden reconocer matices de verdad o de confianza y sugerir posibles soluciones aún cuando ninguna sea "cierta"

Función de Membresía: Es una función $\mu_A(x)$ que asocia cualquier valor de entrada x a su grado de membresía en el conjunto A . Este valor pertenece a el intervalo $[0; 1]$.

Fuzzificación: Conversión de un valor numérico a un grado de membresía difuso, a través de la evaluación de una función de membresía

Grado de membresía: Un elemento x pertenece a un conjunto difuso llamado A con un grado de membresía entre 0 y 1, dado por la función de membresía $\mu_A(x)$.

Grado de verdad: El grado de verdad o grado de activación, de una regla, es un valor entre 0 y 1 que se deduce a partir de los grados de membresía del predicado de la regla. Este afecta directamente el valor de las conclusiones en la regla. También se puede decir que la regla es activa en y .

Inferencia: El cálculo de los grados de activación de todas las reglas en la base así como también de todos los conjuntos difusos de las variables lingüísticas contenidas en las conclusiones de estas reglas.

Lógica difusa: Forma de razonamiento que incorpora criterios múltiples para tomar decisiones y valores múltiples para evaluar posibilidades. La lógica difusa difiere de la dicotómica en este sentido. En lógica dicotómica se espera derivar una solución decidiendo por sí o por no, si cada una de las restricciones o parámetros es verdadera o falsa, pero en lógica difusa es admisible usar escalas de condiciones (restricciones) y matices (flexibilidad) en los valores numéricos. En el intervalo $[0..1]$ puede haber cualquier valor de verdad, sin necesitar ser un número entero.

Predicado: También conocido como premisa o condición. El predicado de una regla es una declaración que combina una variable lingüística con un término lingüístico, y va escritas entre el SI y ENTONCES de la regla. Un predicado puede ser construido a partir de las combinaciones de varias declaraciones unidas por operador AND, OR; NOT.

Premisa: predicado.

Sensor convergente: dato convergente

Singleton: Funciones de membresía $\mu_A(x)$, igual a cero para todo x , excepto para un punto singular de x .

Termino Lingüístico: Termino asociado con la función de membresía, el cual caracteriza la variable lingüística. (Medio, Bajo, Alto)

T-norma y T-conorma: funciones de distribución de probabilidades relacionada con triángulos, que definen las operaciones difusas unión e intersección.

Universo: El universo contiene todos los elementos que pueden entrar en consideración. Antes de diseñar la función de pertenencia, es necesario considerar los universos para las entradas y salidas.

Variable Lingüística: Variable numérica con un nombre (presión, temperatura) a la cual están asociadas términos lingüísticos.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Yager R. "Approximate Reasoning as a Basis for Rule-Based Expert Systems".

IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 14(4), pp. 636-643, 1984

[2] Zadeh & L. A. "Fuzzy Sets: Information and Control", Vol. 8. 1965

[3] Driankov D., Hellendoorn & Reinfrank M., "An Introduction to Fuzzy Control"

New York 1996

Soumitra Dutta, Member, IEEE. FUZZY LOGIC APPLICATIONS: TECHNOLOGICAL AND STRATEGIC ISSUES. IEEE Transactions on engineering management. Vol. 40, No.3, August 1993.

Dr. Bernd Reusch INDUSTRIAL APPLICATIONS OF FUZZY LOGIC IN NORTH-RHINE WESTPHALIA.Prof..

Patrik Eklund. FUZZY LOGIC IN NORTHERN EUROPE:INDUSTRIAL APPLICATIONS AND SOFTWARE DEVELOPMENTS. IEEE 1994

Dipl. Ing. Harald Wegman. Siemens AG, Industrial Automation System Division. FUZZY CONTROL AND NEURAL NETWORKS INDUSTRIAL APPLICATIONS IN THE WORLD OF PLC's.

Constantin von Altrock, Dr. Jorg Gebhardt, Klockner-Moeller Germany. RECENT SUCCESSFUL FUZZY LOGIC APPLICATIONS IN INDUSTRIAL AUTOMATION.

Antonio P. Martins, Adriano S. CONTRIBUTION OF FUZZY LOGIC TO CONTROL AN INDUSTRIAL PROCESS. Carvalho. Faculty of Engineering of the University of Porto Institute of Systems and Robotics. IEEE 1997

Manuel Hernández Calviño, ACLARANDO LA LOGICA BORROSA (FUZZY LOGIC). Facultad de Física, Universidad de La Habana. Revista Cubana de Física. Vol 20. No 2, 2003.

Heikki Koivo. BACKGROUND AND APPLICATIONS OF FUZZY LOGIC.

Jens Alex, Ulrich Jumar and Ralf Tschepetzki. A FUZZY CONTROL APPLICATION TO WASTE WATER TREATMENT PLANTS. IEEE 1994.

JM Sousa, R Babuska, HB Verburggen. INTERNAL MODEL CONTROL WITH A FUZZY MODEL : APPLICATION TO AN AIR – CONDITIONING SYSTEM. Fuzz-IEEE'97

J.S. Taur, C.W. Tao and C. C Tsai. TEMPERATURE CONTROL OF A PLASTIC EXTRUSION BARREL USING PID FUZZY CONTROLLERS.

Gerhard Klett. APPLICATION OF FUZZY CONTROL IN CHEMICAL DISTILLATION PROCESSES.

R.P Jones, A. S Cherry and S. D Farrell. APPLICATION OF INTELLIGENT CONTROL IN AUTOMOTIVE VEHICLES. Control '94, 21-24 March 1994. Conference Publication No. 389. IEE 94

C. von Altrock, B. Krause and H. -J. Simmerman. ADVANCED FUZZY LOGIC CONTROL TECHNOLOGIES IN AUTOMOTIVE APPLICATIONS.

Prokhorenkov A.M, Saburov I. V, Svlukov A.S. APPLICATION OF FUZZY MODELS IN CONTROL SYSTEMS OF BOILER AGGREGATES TECHNOLOGICAL PROCESSES. International Workshop on Intelligent Data Acquisitions and Advanced Computing Systems : Technology and Applications 1-4 July 2001, Forms, Ukraine.

J. Lin and F. L Lewis. FUZZY CONTROLLER FOR FLEXIBLE-LINK ROBOT ARM BY REDUCED-ORDER TECHNIQUES. IEE, 2002. IEE Proceedings online no. 20020338. IEE. Proc-Control Theory Appl, Vol 147, No. 3, May 2002.

Jin, Xiamoing; Rong, Gang; Wang, Shuqing. INDUSTRIAL DISTILLATION COLUMN ADVANCED CONTROL IN A DCS. Proceedings of the 3rd. World Congress on Intelligent Control and Automation. June 28-July 2, 2000.

Melvin AyalaS., Galdenoro Botura Jr., Oscar A. Maldonado A. AI AUTOMATES SUBSTATION CONTROL.IEEE,January 2002.

J A Dunlop, K J Burnham and D J G James. DEVELOPMENTS IN FUZZY CONTROL WITH APPLICATION TO INDUSTRIAL SYSTEMS.

Mauricio Duque, Eugenio Giraldo, Alain Gauthier, Adriana Nuñez. ARRANQUE DE UN REACTOR ANAEROBIO PILOTO USANDO LOGICA DIFUSA.Centro de Innovación y desarrollo tecnológico.Universidad de los Andes 2000.

Piero P. Bonissone, Vivek Badami, Kenneth H, Chiang, Pratap S. Khedkar, Kenneth W. Marcelle and Michael J. Schutten. INDUSTRIAL APPLICATIONS OF FUZZY LOGIC AND GENERAL ELECTRIC.Proceedings of the IEEE, Vol.83 No. 3, March 1995.

Mangesh. V. Bedekar,Hemant. V. Bedekar. AN INTELLIGENT ADAPTIVE FUZZY-NEURAL CONTROL SYSTEM FOR APPLICATIONS IN AHAZARDOUS ENVIRONMENTS.

Rudolf Feliz, Rainer Albersmann, Stefan Reddig. INDUSTRIAL APPLICATION OF FUZZY IMAGE COMPARISON IN QUALITY CONTROL.IEEE1998

Jiaming Wang, Hao Li, Fakhri Karray and Otman Basir. REAL WORLD IMPLMENTATION OF FUZZY ANTI-SWING CONTROL FOR A BEHAVIOR-BASES INTELLIGENT CRANE SYSTEM. Proceedings of the 2003 IEEE/SRJ . Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, Nevada-October 2003.

Situ, Zhong;Wang, Dazhi;Li,Qingliang. RESEARCH OF THE APPLICATION OF INTELLIGENT FUZZY CONTROL IN HIGH RATE HYDRAULIC MACHINE. Proceeding of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation. June 28-July 2, 2000.

Prof. Dr.R. Nagarajan. FUZZY LOGIC APPLICATION IN EXOTHERMAL PROCESSES. School of Engineering and Information Technology.University Malaysia Sabah.

Jifeng Hao, Cunyi Song. APPLICATION OF FUZZY CONTROL FOR COD IN WATER TREATMENT.proceedings German-Chinese-Polish Symposium Environmental Engineering.

Reza Langari. PAST,PRESNT AND FUTURE OF FUZZY CONTROL : A CASE FOR APPLICATION OF FUZZY LOGIC IN HIERARCHICAL CONTROL.IEEE 1999.

Pedro Albertos and Antonio Sala. PERSPECTIVES OF FUZZY CONTROL: LIGHTS AND SHADOWS. Second IEEE international conference on intelligent systems, June 2004.

Stephen Chiu. USING FUZZY LOGIC IN CONTROL APPLICATIONS : BEYOND FUZZY PID CONTROL. IEEE Control Systems.

Hongbo Liu, Shaoyuan Li and Tianyu Chai. INTELLIGENT CONTROL OF POWER-PLANT MAIN STEAM PRESSURE AND POWER OUTPUT. Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado June 4-6, 2003.

Yong-Hua Song and Allan T, Johns. APPLICATIONS OF FUZZY LOGIC IN POWER SYSTEMS. power Engineering Journal . 1999.

Janos Abonyi, Lajos Nagy, Ferenc Szeifert. TAKAGI-SUGENO FUZZY CONTROL OF BATCH POLIMERIZATION REACTORS.

Zhang Xiaogang, Zhang Jing, Chen Hua. THE APPLICATION OF DATA FUSION BASED ON FUZZY THEORY IN TEMPERATURE JUDGEMENT OF ROTARY KILN. Proceedings of the 3rd. World Congress on Intelligent Control and Automation. June 28-July 2, 2000.

Z.Bil, B.S Butkiewicz.FURNACE TEMPERATURE CONTROL WITH FUZZY MICROCONTROLLER. 1999 IEEE Midnight-Sun Workshop on Soft Computing Methods in Industrial Applications. Kuusamo, Finland, June 16-18, 1999.

Zafer Bingul, George E. Cook, and Alvin M Strauss. APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO SPATIAL THERMAL CONTROL IN FUSION WELDING. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 36, No 6, November/December 2000.

Hiroyasu Oshima, Seije Yasunobu and Shin.ichi Sekino. AUTOMATIC TRAIN OPERATION SYSTEM BASED ON PREDICTIVE FUZZY CONTROL. International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications 1988.

Feng Xiaoyun , Jia Jumbo, Li Zhi. THE RESEARCH OF FUZZY PREDICTING AND ITS APPLICATION IN TRAIN'S AUTOMATIC CONTROL.

Yuming Zeng. A NEW CONTROL STRATEGY FOR HYDRAULIC VALVE APPLICATIONS IN OIL FIELD.

David E. Thomas and Brian Armstrong-Helouvry. FUZZY LOGIC CONTROL-A TAXONOMY OF DEMONSTRATED BENEFITS.

Universidad Pontificia de Salamanca en Madrid, ESQUEMA DE LOGICA BORROSA, Diciembre 2001.

Peter Bauer y Stephan Nouak, Roman Winkler, Breve curso de Lógica borrosa y control borroso.

Jan Jantzen, DESIGN OF FUZZY CONTROLLERS, Technical University of Denmark, Department of Automation, Bldg 326, DK-2800 Lyngby, DENMARK. Tech. Report no 98-E 864 (design), 19 Aug 1998.

J. Galindo Gómez, conjuntos y sistemas difusos, Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación Universidad de Málaga.

Leonid Reznik, fuzzy controllers, Victoria University of technology, Melbourne Australia, first published 1977.

Dora María Calderón Nepomuceno, *Control Difuso Adaptable de un Servomecanismo No Lineal*, CENTRO de INVESTIGACIÓN y de ESTUDIOS AVANZADOS del IPN, Noviembre de 2003

Miguel Ángel Lozano Ortega e Ignacio Iborra Baeza, EL MÓDULO DE LÓGICA DIFUSA, Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial Universidad de Alicante Julio 2001

Web sites:

www.ieee.org

IEEE Transaction on Fuzzy Systems

IEEE Transaction on Automatic Control

IEEE Transaction on Control Systems Technology

IEE Control Theory and Applications

<http://www.aptronix.com/fuzzynet/applnote/reactor.htm>: Reactor Temperature Controller

http://wastemgmt.ag.utk.edu/fuzzy_logic.htm : Tratamiento anaeróbico

http://www.fuzzytech.com/e/e_a_dek.html : Aplicaciones varias.

<http://www.manufacturing.net/ctl/article/CA259215> : Artículo que comprara técnicas de control convencional con Fuzzy.

http://www.eunite.org/earchives/tech_reports/Intelligent_Control_of_a_Rotary_Kiln.htm Horno de Cementera para control de temperatura

<http://www.manufacturing.net/ctl/article/CA372359> Temperatura PID Vs Fuzzy

<http://www.ic-tech.com/Fuzzy%20Logic/sld062.htm> Aplicaciones en Automóviles

http://www.sckcen.be/sckcen_en/publications/scientrep/99/reactorsafety_3.pdf

Reactores.

<http://tomsovic.eecs.wsu.edu/Vitae/Publications/TOMS99.pdf> Fuzzy in power plant

<http://www.fmt.vein.hu/softcomp/Abonyi97-INES.pdf> en Polimerización

<http://www.comp.nus.edu.sg/~pris/FuzzyLogic/HistoricalPerspectiveDetailed1.html>

Perspectivas fuzzy